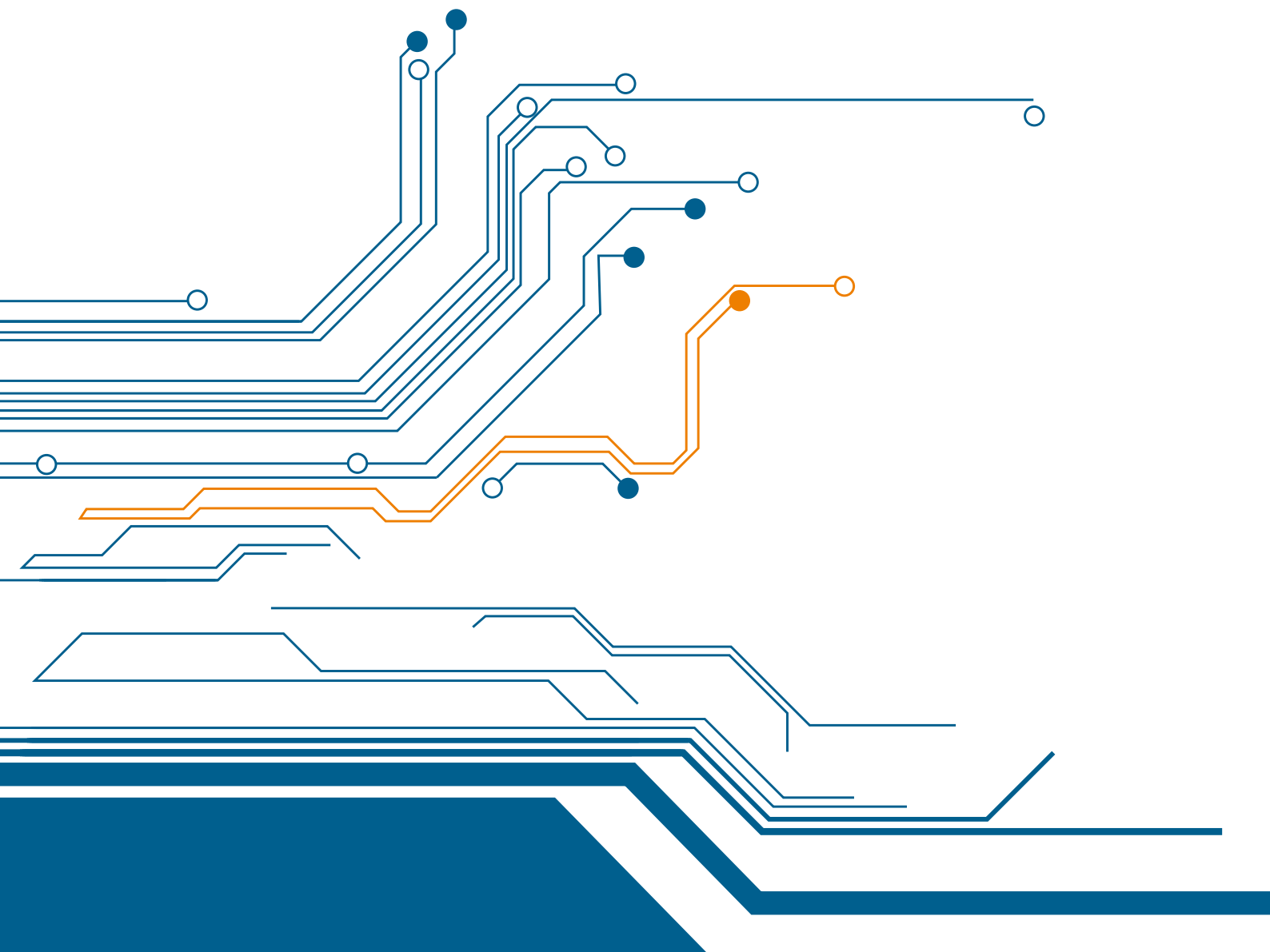


Jürgen Willmann

INNOVATIONEN IN DER DRUCKBAREN ELEKTRONIK

Von der Idee zur Produktion.
Eine technische & wirtschaftliche Analyse



Innovationen in der druckbaren Elektronik:

Von der Idee zur Produktion. Eine technische und wirtschaftliche Analyse.

Jürgen Willmann

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-8439-1263-1

Einbandlayout: Designova

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-3644

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3644>

Dieses Dokument wird neben der Version mit ISBN auch bereitgestellt von tuprints, E-Publishing-Service der TU Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>
tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

© Verlag Dr. Hut, München 2013
Sternstr. 18, 80538 München
Tel.: 089/66060798
www.dr.hut-verlag.de

Die Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Autoren und ggf. Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der Vervielfältigung und Verbreitung in besonderen Verfahren wie fotomechanischer Nachdruck, Fotokopie, Mikrokopie, elektronische Datenaufzeichnung einschließlich Speicherung und Übertragung auf weitere Datenträger sowie Übersetzung in andere Sprachen, behält sich der Autor vor.

1. Auflage 2013

Innovationen in der druckbaren Elektronik:

Von der Idee zur Produktion. Eine technische und wirtschaftliche Analyse.

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jürgen Willmann
aus Donaueschingen

Berichtersteller: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Mitberichtersteller: Jun.-Prof. Dr. Alexander Bode

Mitberichtersteller: Prof. Donald Lupo

Datum der Einreichung: 06.11.2012

Datum der mündlichen Prüfung: 19.12.2012

Darmstadt 2012

D17

Vorwort

Die druckbare Elektronik ist noch eine junge Technologie, der großes Potential vorhergesagt wird. So wird für die druckbare Elektronik mittel- bis langfristig ein globales Marktvolumen von mehreren hundert Milliarden Euro prognostiziert. Der Erfolg der druckbaren Elektronik hängt auch davon ab, ob die vielen Produktideen in eine erfolgreiche Produktion überführt werden können. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht daher die Fragestellung, welche Einflussfaktoren die Produktion von druckbarer Elektronik bestimmen. Der daraus abgeleitete Innovationsprozess dient in der Unternehmenspraxis als Leitfaden, der Unternehmen die Möglichkeit bietet, ihre Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu strukturieren und ein umfassendes Bild der Einflussfaktoren und möglicher Problemfelder zu erarbeiten.

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) der Technischen Universität Darmstadt in der Arbeitsgruppe *Funktionales Drucken* von Dr. Hans Martin Sauer.

Mein ganz besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Dörsam für sein Vertrauen, die vielen Diskussionen und Anregungen sowie die Möglichkeit stets selbständig und eigenverantwortlich arbeiten zu können.

Jun.-Prof. Dr. Alexander Bode danke ich für die Übernahme des Koreferats und den damit verbundenen Aufwand sowie für die vielen Diskussionen und Anregungen. Prof. Donald Lupo danke ich für die Übernahme des zweiten Koreferats und den damit verbundenen Aufwand.

Hervorheben möchte ich die stets gute Zusammenarbeit mit meinen Kollegen Hans Martin, Simon, Robert, Constanze, Veselin, Kathrin, Stefan, Maria, Nils, Wolfgang, Simone, Michael, Martin, Ingmar, Larisa, Steffi und Alex. Betonen möchte ich auch die vielen guten und hilfreichen Diskussionen sowie die schöne Zeit über die Arbeit hinaus. Herzlichen Dank auch an unsere guten Seelen aus dem Sekretariat für die hervorragende organisatorische Unterstützung sowie an Herrn Dr. Neudörfer für seinen motivierenden Spruch: „Heute schon promoviert?“ Hervorheben möchte ich auch die stets gute Zusammenarbeit mit meinen Diplomanden, Studienarbeitern, Seminarteilnehmern und Hiwis, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben. Ich möchte besonders Herrn Stocker und Herrn Uellner für ihr Engagement danken.

Zu guter Letzt bedanke ich mich ganz herzlich bei meiner Familie und engsten Freunden für die fortwährende moralische Unterstützung. Besonders meinen Eltern, meinen Geschwistern und meiner Frau danke ich für die umfassende Unterstützung, die Motivation und den Rückhalt. Vor allem Anne und Pauline mussten lange ohne mich zurechtkommen. Ihr habt einen großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit

Darmstadt, im Dezember 2012

Jürgen Willmann

„**Planung** ist die gedankliche Vorwegnahme einer zielgerichteten aktiven Zukunftsgestaltung. Sie beinhaltet das systematische Suchen und Festlegen von Zielen sowie Aufgaben und Mitteln zum Erreichen der Ziele.“¹

¹ Verband für Arbeitsstudien (1974).

Kurzfassung.....	1
1. Einleitung	5
2. Stand der Technik und Wissenschaft.....	13
2.1. Druckbare Elektronik.....	13
2.1.1. Organische Photovoltaik (OPV).....	18
2.1.2. Organische Leuchtdioden (OLED)	33
2.1.3. Organischer Feldeffekttransistor (OFET).....	40
2.1.4. Applikationen der druckbaren Elektronik.....	46
2.2. Überblick der technischen Grundzüge	50
2.2.1. Fertigungsverfahren für die druckbare Elektronik.....	51
2.2.1.1. Vakuumlose Fertigungsverfahren	58
2.2.1.2. Vakuumbasierte Fertigungsverfahren	66
2.2.2. Charakteristiken von funktionalen Schichten	73
2.3. Überblick der wirtschaftlichen Grundzüge.....	79
2.3.1. Grundlagen der Produktion.....	79
2.3.2. Produktionskennzahlen	92
2.3.3. Wirtschaftlichkeit	94
2.3.3.1. Begriffsklärung	95
2.3.3.2. Beurteilung von Investitionsalternativen	98
3. Analyse kritischer Parameter zum Aufbau einer Produktion	103
3.1. Darstellung des Fertigungsprozesses von organischer Photovoltaik..	104
3.1.1. 1. Teilprozess: Vorbehandlung der zu bedruckenden Oberfläche.	105
3.1.2. 2. Teilprozess: Applizieren der funktionalen Schichten.....	108
3.1.3. 3. Teilprozess: Nachbehandlung.....	112
3.1.4. 4. Teilprozess: Verkapselung	115
3.2. Herleitung und Identifikation kritischer Parameter	118
3.2.1. Parameter des Device-Layouts.....	122
3.2.2. Parameter der Funktionsfluide	123
3.2.3. Parameter der Substrate.....	124
3.2.4. Sonstige Parameter.....	126
3.2.5. Zusammenfassung und Bewertung der kritischen Parameter	126
3.3. Technische und wirtschaftliche Analyse der kritischen Parameter....	128
3.3.1. Untersuchung der Einflussfaktoren des Device-Lavouts	128

3.3.2. Untersuchung der Einflussfaktoren des Funktionsfluids.....	131
3.3.3. Untersuchung der Einflussfaktoren des Substrats.....	137
3.3.4. Untersuchung der sonstigen Einflussfaktoren.....	140
3.4. Zusammenfassung	147
4. Einfluss entscheidender Parameter auf die Produktion	149
4.1. Systematik substratbasierter Produktion	150
4.2. Fertigungsverfahren als Teil der Produktion.....	159
4.2.1. Auswahl von Fertigungsverfahren	159
4.2.2. Weitere Aspekte von Fertigungsverfahren in der Produktion	172
4.3. Einfluss der Substrattransportmethode auf die Produktion	177
4.3.1. Anforderungen der druckbaren Elektronik an Substrate und deren Transport	178
4.3.2. Substrattransportmethoden.....	179
4.3.2.1. Roll-to-Roll - Transport (R2R)	180
4.3.2.2. Sheet-to-Sheet - Transport (S2S).....	182
4.3.2.3. Sheets-on-Shuttle - Transport (Shuttle-Transport)	184
4.3.2.4. Hybride Transportmethoden wie Roll-to-Sheets - Transport (R2S)	186
4.3.3. Kriterien zur Bewertung von Substrattransportmethoden.....	188
4.3.3.1. Flexibilität	189
4.3.3.2. Qualität	192
4.3.3.3. Zuverlässigkeit.....	194
4.3.3.4. Produktivität.....	195
4.3.3.5. Betrieb und Instandhaltung.....	195
4.4. Anordnung der Bearbeitungsstationen zu einem optimalen Produktionssystem	198
4.4.1. Optimierung des Produktionssystems nach der Zeit.....	204
4.4.1.1. Optimierung durch Parallelisieren der Bearbeitungsstationen .	205
4.4.1.2. Optimierung durch Reduzieren der Abrollvorgänge.....	209
4.4.1.3. Optimierung durch Parallelisieren und Reduzieren der Abrollvorgänge.....	213
4.4.1.4. Optimierung durch automatischem Rollenwechsel	215
4.4.1.5. Zusammenfassung der Optimierung des Produktionssystems nach der Zeit	217

4.4.3. Optimierung des Produktionssystems nach dem Zeitpunkt der Vereinzelung	222
4.4.4. Substrathandling in der Produktion	225
4.5. Zusammenfassung	229
5. Innovationsprozess der druckbaren Elektronik.....	231
5.1. Grundlagen des Innovationsprozesses	231
5.2. Die fünf Phasen des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik	236
5.2.1. 1. Phase: Produktplanung	240
5.2.2. 2. Phase: Produktentwicklung	244
5.2.3. 3. Phase: Produktionssystemplanung	247
5.2.4. 4. Phase: Produktionsplanung	250
5.2.5. 5. Phase: Umsetzung	255
6. Wirtschaftliche Betrachtung.....	259
6.1. Wirtschaftlichkeitsanalyse der Produktionssystemplanung.....	259
6.1.1. Randbedingungen und Annahmen	260
6.1.2. Ergebnisse	272
6.2. Kooperation im Innovationsprozess	282
6.2.1. Grundlagen von Kooperationen.....	282
6.2.1.1. Ziele / Vorteile von Kooperationen	282
6.2.1.2. Kooperationsformen	286
6.2.2. Kooperationen in der druckbaren Elektronik.....	288
7. Schlussbetrachtung	291
7.1. Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	292
7.2. Ausblick	296
8. Literaturverzeichnis.....	299

Kurzfassung

Die druckbare Elektronik ist noch eine junge Technologie, der großes Potential vorhergesagt wird. So wird für die druckbare Elektronik mittel- bis langfristig ein globales Marktvolumen von mehreren hundert Milliarden Euro prognostiziert. Druckbare Elektronik beschreibt eine Technologie, die mit angepassten Materialien in Kombination mit adaptierten Fertigungstechnologien, neuartige Anwendung ermöglicht, die der konventionellen Elektronik bisher nicht zugänglich waren. Beispiele für diese neuen Anwendungen sind: OLED-Beleuchtung, intelligente Verpackungen, Smart Labels, RFIDs, Aktoren, flexible bzw. rollbare Displays, flexible Solarzellen und Batterien. Der Erfolg der druckbaren Elektronik hängt auch davon ab, ob die vielen Produktideen in eine erfolgreiche Produktion überführt werden können. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht daher die Fragestellung, welche Einflussfaktoren die Produktion von druckbarer Elektronik bestimmen.

Hierfür wird zunächst das Untersuchungsobjekt Produktion von druckbarer Elektronik definiert und die Begriffe abgegrenzt. Daraufhin werden die kritischen Parameter zum Aufbau einer Produktion druckbarer Elektronik analysiert und beschrieben, um daraus Hypothesen ableiten zu können. Die drei wichtigsten Parameter werden im Detail untersucht und Lösungsansätze erarbeitet: Auswahl eines Fertigungsverfahrens und der Substrattransportmethode sowie Anordnung von Bearbeitungseinheiten zu einem optimalen Produktionssystem. Daraus wird erstmals eine Systematik hergeleitet, welche grundlegend jede Art von substratbasierter Produktion mit sechs Komponenten charakterisiert.

Auf den Erkenntnissen aufbauend, wird der aus der Literatur im Detail dargestellte Innovationsprozess auf die druckbare Elektronik adaptiert. Der Innovationsprozess wird in fünf Phasen eingeteilt, die auf dem Weg von der Idee bis zur Produktion durchlaufen werden müssen. Der Innovationsprozess wird als Ablaufplan dargestellt, um den iterativen Charakter wiederzugeben. Dieser Innovationsprozess wird darauf folgend unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet. Hierfür werden zunächst die erarbeiteten Produktionssysteme einer Wirtschaftlichkeitsanalyse unterzogen. Danach werden die Vorteile von Koope-

rationen in Innovationsprozessen erarbeitet und diese auf die druckbare Elektronik übertragen.

Somit wird einerseits ein Leitfaden für die Unternehmenspraxis erarbeitet, der Unternehmen die Möglichkeit bietet, ihre Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu strukturieren und ein umfassendes Bild der Einflussfaktoren und möglicher Problemfelder zu erarbeiten. Andererseits dient diese Darstellung der theoretischen Diskussion, indem sie einen Beitrag zur Begriffsbildung und Strukturierung für den Innovationsprozess und speziell für die Produktion von druckbarer Elektronik leistet.

Abstract

Printable electronics is a young technology whose medium-term to long-term market worth is predicted to be several hundred billion euros. Printable electronics uses adapted materials and adapted production technologies to create new applications that were not previously feasible using conventional electronics. Examples include OLED lighting, smart packaging, smart labels, RFIDs, actuators, flexible and rollable displays, flexible solar cells and batteries. Since the success of printable electronics depends on developing product ideas into practicable production processes, this work focuses on identifying the factors that determine the production of printable electronics.

First, I define printable electronics production. Then, I identify and describe the critical parameters for printable electronics production processes. Finally, the three main parameters - manufacturing method, substrate transport method and optimal arrangement of processing units - are analyzed in detail and solutions are developed. Here, I characterize for the first time each type of substrate-based manufacturing process using six components.

Based on the perception, I adapt the detailed, illustrated innovation process to printable electronics. I divide the innovation process into five phases that link the initial idea to the final production system, and display it in a flow chart to reflect its iterative nature. I then analyze the economics of the production system. Finally, I describe the advantages of cooperation in innovation processes and transfer them to printable electronics.

In summary, my presentation serves two purposes: First, it offers companies practical guidelines for structuring their R&D projects and provides them with an overview of the main parameters and problem areas. And second, it advances the theoretical discussion by more precisely describing the innovation process for printable electronics production systems.

1. Einleitung

Die druckbare Elektronik ist noch eine junge Technologie, der großes Potential vorhergesagt wird. So wird für die druckbare Elektronik mittel- bis langfristig ein globales Marktvolumen von mehreren hundert Milliarden Euro² prognostiziert, „was in etwa dem wirtschaftlichen Stellenwert der heutigen konventionellen, siliziumbasierten Elektronik entspricht.“³ Diese Prognosen sind vor allem vor dem Hintergrund der zahlreichen Herausforderungen zu sehen, die in den nächsten Jahrzehnten von der Menschheit bewältigt werden müssen.⁴ Dazu zählen unter anderem die folgenden Themenfelder:

- 1) Energieversorgung
- 2) Wasser-und Lebensmittelanalytik
- 3) Mobilität
- 4) Ökologische Nachhaltigkeit
- 5) Sicherheit
- 6) Gesundheit und Demographie
- 7) Bildung⁵

Diese Trends verändern die Art, wie Menschen in einer modernen Gesellschaft leben und arbeiten. Diese Herausforderungen betreffen allerdings nicht nur die industrialisierte Welt, sondern vor allem auch die Entwicklungsländer.

Die druckbare Elektronik kann dazu einen Beitrag leisten, diese Herausforderungen zu meistern. Druckbare Elektronik beschreibt eine Technologie, die mit angepassten Materialien in Kombination mit adaptierten Fertigungstechnologien, neuartige Anwendung ermöglicht, die der konventionellen Elektronik bisher nicht zugänglich waren. Beispiele für diese neuen Anwendungen sind:

² vgl. Das/Harrop (2007).

³ Schnell (2011).

⁴ Clemens u. a. (2011).

⁵ In dem „Millennium Project“ versuchen Wissenschaftler die größten Herausforderungen der Menschheit in den kommenden Jahrzehnten zu benennen und zu beschreiben. Dort werden 15 Herausforderungen der Menschheit identifiziert. Allerdings kann die druckbare Elektronik nicht zu allen Problemen einen Beitrag leisten, so dass hier nur ein Auszug dargestellt ist. vgl. Florescu/Gordon/Glenn (2012).

OLED-Beleuchtung, intelligente Verpackungen, Smart Labels, RFIDs, Aktoren, flexible bzw. rollbare Displays, flexible Solarzellen und Batterien, Einweg-Diagnose-Vorrichtungen...

Vor allem die gedruckte Photovoltaik kann einen entscheidenden Beitrag zur Energieversorgung in der Zukunft beitragen, da sie zum einen sehr kostengünstig hergestellt werden kann und zum anderen keine seltenen oder giftigen Materialien benötigt.⁶ Diese Anwendungen sind möglich, da Materialien entwickelt wurden, die zum einen elektronische Funktionalitäten wie Leiter, Halbleiter und Isolatoren ermöglichen und zum anderen flüssig prozessierbar sind. Der eigentliche **Vorteil** der Technologie ist, dass die Materialien mit Druck- und Coating-Verfahren prozessiert werden können, wenn sie in Lösemittel verflüssigt werden. Somit sind elektronische Komponenten zu geringen Kosten und in großer Menge produzierbar. Der Einsatz von Drucktechnologien ermöglicht gegenüber der gegenwärtigen Siliziumherstellung eine erhebliche Reduzierung der Herstellungskosten durch das sehr schnelle Bedrucken großflächiger und flexibler Substrate. Die entstehenden Produkte sind dünn, leicht, robust, flexibel und umweltfreundlich. Dadurch wird die Technologie Auswirkungen auf viele bestehende Produkte und Märkte haben. Mit diesen Vorteilen kann sich die druckbare Elektronik zu einem größeren Markt entwickeln als die konventionelle, siliziumbasierten Elektronik.⁷

Während in der konventionellen, siliziumbasierten Elektronik weitestgehend die Wertschöpfung in Asien stattfindet, werden mit der druckbaren Elektronik Chancen für einen neuen Industriesektor in Deutschland und Europa verbunden. „Eine starke chemische Industrie und materialwissenschaftliches Know-how in Deutschland stellen eine gute Basis im weltweiten Wettbewerb dar.“⁸ Neben der Materialentwicklung bestehen Chancen, in Deutschland und Europa weitere Felder entlang der Wertschöpfungskette zu besetzen. Dazu zählen die Device- und Produktentwicklung sowie die Entwicklung von Maschinen und Anlagen.

⁶ vgl. McGeehee (2012).

⁷ vgl. Das/Harrop (2007).

⁸ Schnell (2011). Unternehmen wie BASF, Evonik, Merck und Novaled sind in diesem Feld tätig.

Auf dem Weg zu Produkten der druckbaren Elektronik, sind noch einige Hürden zu bewältigen. So sieht der Branchenverband OE-A folgende Herausforderungen:

- 1) Verbesserung der Materialien (Leistung, Prozessierbarkeit und Stabilität)
- 2) Verbesserung der Substrate und Verkapselung
- 3) Erstellen von Standards und Normen
- 4) Verbesserung der Prozesse (Auflösung, Registrierung, Uniformität und Prozessstabilität⁹)

In einem Satz lässt sich sagen, dass der Erfolg der druckbaren Elektronik davon abhängt, ob die vielen Produktideen in eine wirtschaftliche Produktion überführt werden können. Hierfür müssen die oben genannten Herausforderungen gelöst werden, aber darüber hinaus ist es noch ein großer Schritt von den Einzelprozessen hin zu einer funktionierenden und wirtschaftlichen Produktion.

Aus diesem Grund steht in dieser Arbeit die Fragestellung im Mittelpunkt, welche Einflussfaktoren die Produktion von druckbarer Elektronik bestimmen. Der Produktionsprozess wird in dieser Arbeit in einem erweiterten Kontext betrachtet. So wird die Frage nach den Einflussfaktoren der Produktion im Zusammenhang des Innovationsprozesses untersucht. Hierfür wird zunächst der Innovationsprozess für die druckbare Elektronik beschrieben.

Eine wissenschaftliche Untersuchung der Produktion und des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik wurde bisher nicht durchgeführt,¹⁰ so dass mit der vorliegenden Arbeit diese Forschungslücke bearbeitet wird. Ziel dieser Arbeit ist, die Frage sowohl aus theoretischer Sicht als auch mit Blick auf die Praxis zu untersuchen. Diese Arbeit nähert sich der Thematik von einer Seite, die sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte aggregiert betrachtet.

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst ein grundsätzliches Begriffsverständnis für die druckbare Elektronik sowie für die technischen und wirtschaftlichen Grundzüge erarbeitet. Aus diesem spezifischen Verständnis heraus werden die technischen Zusammenhänge, die für eine solche Produktion notwendig sind, analysiert und in einen wirtschaftlichen Zusammenhang gesetzt. Die technische Analyse soll nicht Selbstzweck sein, sondern wird in den Innovationsprozess

⁹ vgl. Clemens u. a. (2011).

¹⁰ Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten liegt auf der Erforschung der Materialien sowie der Devices.

eingebunden, so dass daraus die Ziele für eine wirtschaftlich erfolgreiche Produktion abgeleitet werden können. Unter Verwendung von technischen und wirtschaftlichen Ansätzen, verfolgt diese Arbeit daher wissenschaftliche und auch praxisorientierte Ziele:

- 1) Abgrenzung des Begriffsapparats (deskriptives Wissenschaftsziel),
- 2) Analyse der Zusammenhänge von Produktion von druckbarer Elektronik (theoretisches Ziel)
- 3) Entwicklung von Gestaltungsempfehlungen und eines Leitfadens auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse (pragmatisches Ziel).

Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit¹¹

Ein Überblick über den Aufbau der Arbeit ist in Abb. 1.1 dargestellt.

In **Kapitel 2** wird das Untersuchungsobjekt *Produktion von druckbarer Elektronik* definiert und die Begriffe abgegrenzt. Hierfür wird zunächst der Begriff der druckbaren Elektronik definiert und beschrieben. Danach werden die drei Haupt-Applikationen der druckbaren Elektronik OPV, OLED und OFET definiert und im Detail beschrieben. Ergänzt werden weitere Applikationen der druckbaren Elektronik wie Sensoren, anorganische Elektrolumineszenz, leitende Strukturen, Batterien und Smart Labels.

Daraufhin wird ein Überblick über die technischen Grundzüge erarbeitet und die Fertigungsverfahren der druckbaren Elektronik systematisiert und die wichtigsten Verfahren im Detail beschrieben. Abgeschlossen werden die technischen Grundzüge mit der Beschreibung der Charakteristiken funktionaler Schichten. Danach wird ein Überblick über die wirtschaftlichen Grundzüge erarbeitet. Hierfür werden die Grundlagen zur Produktion und Produktionskennzahlen im Hinblick auf die Produktion druckbarer Elektronik beschrieben, sowie die Grundlagen zur Beurteilung von Investitionsalternativen erarbeitet.

Dieses Begriffsgerüst bildet die Grundlage für die in **Kapitel 3** durchgeführte *Analyse der kritischen Parameter zum Aufbau einer Produktion*. Die Parameter

¹¹ Während dieser Untersuchung wird häufiger aus Sicht eines Unternehmers geschrieben, und somit gewisse Fragestellungen vor allem aus wirtschaftlicher Sicht betrachtet. Einige feststehende Begriffe der druckbaren Elektronik haben sich auch im deutschen Sprachgebrauch als englische Fachwörter etabliert. Für diese Begriffe wird nicht versucht eine notdürftige Übersetzung zu finden, sondern direkt der Fachbegriff genutzt.

werden auf theoretischer Ebene analysiert. Hierfür wird eine grundlegende Klassifikation der kritischen Parameter zum Aufbau einer Produktion druckbarer Elektronik erarbeitet. Damit gilt es, die Diskussion um die druckbare Elektronik mit Hinblick auf die künftigen Herausforderungen, die ein Upscaling mit sich bringt, zu strukturieren.

Zunächst wird der Fertigungsprozess von organischer Photovoltaik in möglichst allgemeiner Form dargestellt. Auf dieser Darstellung aufbauend werden die kritischen Parameter zum Aufbau einer Produktion druckbarer Elektronik hergeleitet und beschrieben. Die wichtigsten Parameter werden einer technischen und wirtschaftlichen Analyse unterzogen, um daraus Hypothesen ableiten zu können.

Die drei wichtigsten Parameter aus Kapitel 3 werden in **Kapitel 4** im Detail untersucht und Lösungsansätze erarbeitet. Zunächst wird erstmals eine Systematik hergeleitet, welche grundlegend jede Art von substratbasierter Produktion mit sechs Attributen charakterisiert.

In Kapitel 4.2 wird erstmals eine Systematik zur Auswahl eines Fertigungsverfahrens für die druckbare Elektronik erarbeitet und in einem iterativen Ablaufplan dargestellt. Daraufhin wird der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Produktion für vakuumbasierte und vakuumlose Verfahren untersucht.

In Kapitel 4.3 wird der Einfluss der Substrattransportmethode auf die Produktion untersucht. Hierfür werden erstmals vier mögliche Substrattransportmethoden identifiziert und im Detail beschrieben. Zur Auswahl der passenden Substrattransportmethode für einen Produktionsprozess wird eine Systematik erarbeitet.

In Kapitel 4.4 wird der Einfluss der Struktur eines Produktionssystems auf die Auslegung einer Anlage untersucht. Hierfür werden unterschiedliche Lösungen zur Anordnung von Bearbeitungseinheiten zu einem optimalen Produktionssystem analysiert. Im letzten Abschnitt werden die Besonderheiten des Handlings von Substraten in einer Produktion beschrieben.

Kapitel 5 stellt den ersten gestalterischen Teil der Arbeit dar. Hier wird auf hohem Abstraktionsgrad ein *Innovationsprozess* für die druckbare Elektronik konzipiert. Hierfür werden die Erkenntnisse aller vorausgehenden Abschnitte zusammengeführt. So werden die in Kapitel 3 analysierten Einflussparameter sowie die Ergebnisse der detaillierten Untersuchungen der wichtigsten Einflussparameter aus Kapitel 4 eingebunden.

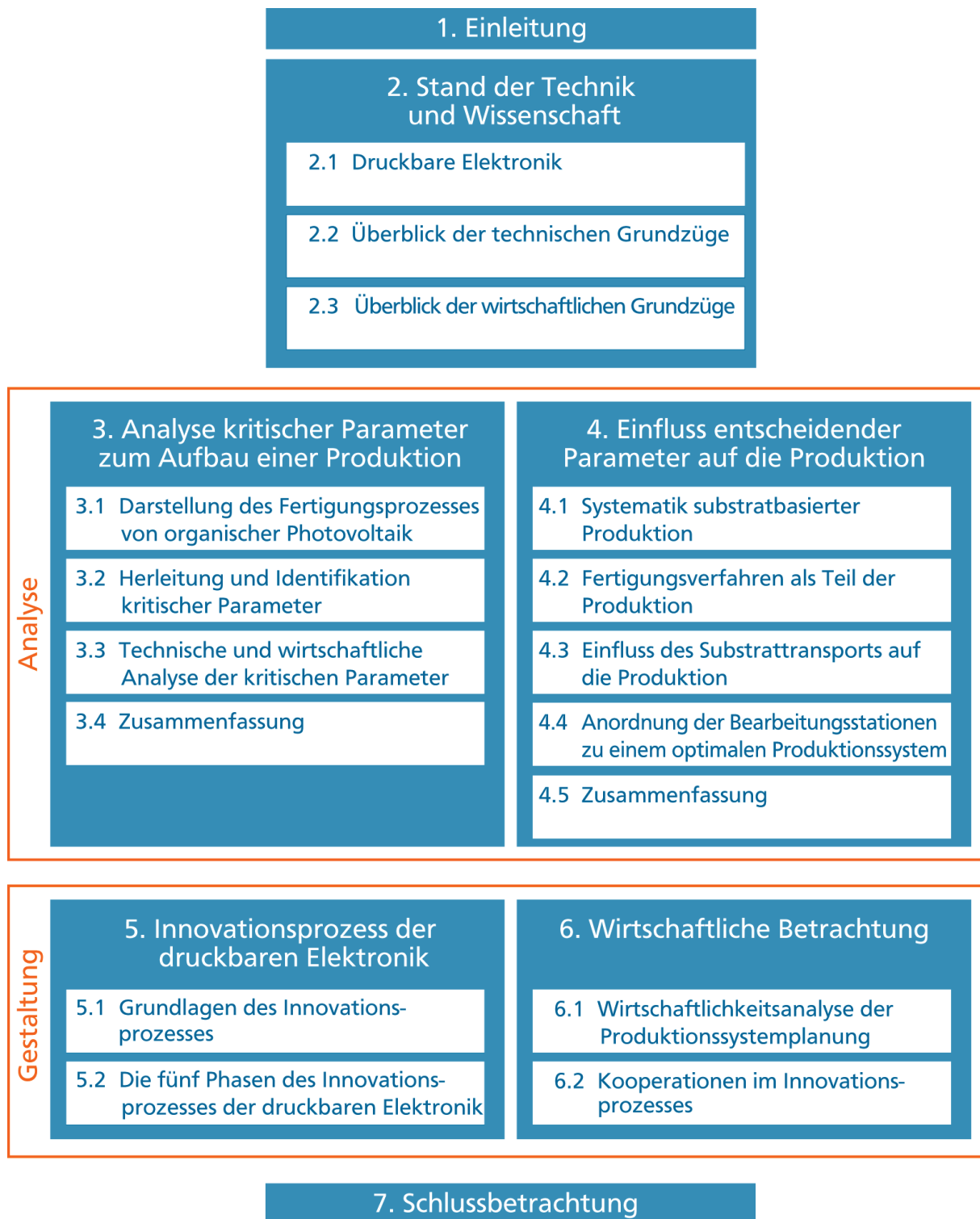


Abb. 1.1: Aufbau der Arbeit

Darauf aufbauend wird der aus der Literatur im Detail dargestellte Innovationsprozess auf die druckbare Elektronik adaptiert. Es wird eine Vorgehensweise entwickelt, welche für den allgemeinen Lösungsprozess eines Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik angewendet werden kann. Damit wird einerseits ein Leitfaden für die Unternehmenspraxis erarbeitet, andererseits dient diese Darstellung der theoretischen Diskussion, indem sie einen Beitrag zur Begriffsbildung und Strukturierung für den Innovationsprozess und speziell für die Produktion von druckbarer Elektronik leistet.

In **Kapitel 6** wird der Innovationsprozess unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet. Hierfür werden zunächst die in Kapitel 4.4 erarbeiteten Produktionssysteme einer Wirtschaftlichkeitsanalyse unterzogen, um auf Basis technischer und wirtschaftlicher Informationen ein überzeugendes Ergebnis zu erhalten. Im zweiten Abschnitt werden die Vorteile von Kooperationen in Innovationsprozessen erarbeitet und diese auf die druckbare Elektronik übertragen.

Eine Zusammenfassung sowie einen Ausblick wird in der Schlussbetrachtung in **Kapitel 7** gegeben.

Das Forschungsumfeld

Diese Untersuchung fand in dem Forschungsumfeld des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren - IDD der TU Darmstadt sowie dem Spitzencluster Forum Organic Electronics statt. So flossen die Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Aufbau der gemeinsamen Forschungsaktivitäten am Standort der InnovationLAB GmbH sowie aus den Spitzencluster-Forschungsprojekten PolytoS, Kosadis, PriO, NanoPEP und vor allem aus dem Projekt GUTENBERG - Grundlegende applikationsunabhängige Untersuchung der Verfahrenstechnik der Organischen Elektronik in diese Untersuchung mit ein.¹² Auch die Erfahrungen aus der Tätigkeit im Branchenverband Organic Electronics Association - OE-A ist ein wichtiger Bestandteil der Erfahrungen.

Ebenso sind die Ergebnisse und Erfahrungen aus gemeinsamen Forschungsaktivitäten mit Jun.-Prof. Dr. Alexander Bode vom Fachgebiet Cluster & Wertschöpfungsmanagement der TU Darmstadt ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit.

¹² Ziel des Forschungsvorhabens war die grundlegende, applikationsunabhängige Untersuchung von Druck-, Prozess- und Verfahrenstechniken sowie Qualitätssicherungsverfahren für die organische Elektronik. Die entsprechende Infrastruktur wurde in dem Reinraum an der zentralen Forschungseinrichtung des Clusters „Forum Organic Electronics“, an dem Standort der InnovationLab GmbH in Heidelberg, aufgebaut.

Vor allem aber bildet die gemeinsame Forschungstätigkeit der Gruppe Funktionales Drucken am IDD die Grundlage dieser Untersuchung. So ist diese Arbeit in Ergänzung zu anderen Forschungstätigkeiten zu sehen. Sauer und Bornemann erforschen die physikalischen Vorgänge beim Drucken dünner Schichten und beschreiben die Effekte, die Einfluss auf die Filmbildung und Schichtstabilität haben.¹³ Bornemann untersucht das Befüllen und Entleeren von Näpfchen im Tiefdruck.¹⁴ Stahl erforscht den Einfluss von Fluidparametern auf den Druckprozess.¹⁵ Thieme erforscht zum einen den Tiefdruck auf Glas und optimiert die Prozesstechnik von Tiefdruckmaschinen.¹⁶ Darüber hinaus untersucht Thieme das Farbübertragungsverhalten von Rasterwalzen.¹⁷ Theopold erforscht die Eignung von Flexodruckformen für das Drucken funktionaler Fluide und der dabei eingesetzten Lösemittel,¹⁸ während Griesheimer die Vorgänge der Farbspaltung bei Flexodruckformen unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit untersucht.¹⁹ Ranfeld erforscht die Eignung des Flexodruckverfahrens für das Drucken von Source-Drain-Strukturen für Transistoren.²⁰ Haas erforscht das Drucken von Stapelaktoren. Dilfer untersucht die Verdruckbarkeit von anorganischen Materialien sowie das Drucken von Frontside Metalization für Solarzellen im Flexodruck.²¹ Spiehl, Pankalla und Ganz untersuchen den Einfluss von Druckparametern auf die elektrischen Eigenschaften von Transistoren.²² Begleitet wurde diese Untersuchung von mehreren studentischen Arbeiten, die im Text als Quelle direkt angegeben sind.

¹³ vgl. Bornemann/Sauer/Dörsam (2011); Bornemann (2012); Sauer (2012a); Sauer/Bornemann (2010).

¹⁴ vgl. Bornemann/Sauer/Dörsam (2012).

¹⁵ vgl. Stahl/Dörsam (2012b); Stahl/Sauer/Dörsam (2012); Stahl/Sauer/Dörsam (2011).

¹⁶ vgl. Thieme/Jürgen Willmann (2012).; vgl. Thieme/Oberle/Sauer (2012).

¹⁷ vgl. Thieme (2007).; vgl. Bornemann u. a. (2011).

¹⁸ vgl. Theopold/Sauer/Dörsam (2011); Theopold u. a. (2012); Theopold/Massfelder/Dörsam (2012).

¹⁹ vgl. Griesheimer/Dörsam (2012).

²⁰ vgl. Ranfeld/Sauer/Dörsam (2011); Ranfeld/Dörsam (2012).

²¹ vgl. Dilfer/Dörsam (2009); Frey u. a. (2011b); Hoffmann/Dilfer/Schneider (2011); Hoffmann u. a. (2010).

²² vgl. Spiehl u. a. (2012); Hengen u. a. (2010); Pankalla/Hengen/u. a. (2011); Pankalla u. a. (2012).

2. Stand der Technik und Wissenschaft

In diesem Abschnitt wird zunächst das begriffliche Verständnis für diese Arbeit erarbeitet. Da es sich um eine interdisziplinäre Arbeit handelt, werden hierfür die technischen und wirtschaftlichen Begriffe erklärt. Zunächst wird der Begriff der druckbaren Elektronik abgegrenzt und im Detail diskutiert. Danach werden die Begriffe organische Photovoltaik, organische Leuchtdioden, organischer Feldeffekttransistor und weitere Applikationen der druckbaren Elektronik erklärt. Anschließend wird ein Überblick über die notwendigen technischen Grundzüge dieser Arbeit gegeben. Dazu gehören zum einen die Fertigungsverfahren der druckbaren Elektronik und zum anderen die Charakteristiken von funktionalen Schichten. Nachstehend wird ein Überblick über die notwendigen wirtschaftlichen Grundzüge dieser Arbeit gegeben. Hierzu gehören die Grundlagen der Produktion sowie Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsanalyse.

2.1. Druckbare Elektronik

Der Begriff druckbare Elektronik beschreibt eine Technologie, die mit angepassten Materialien in Kombination mit adaptierten Fertigungstechnologien²³, neuartige Anwendung ermöglicht, die der konventionellen Elektronik bisher nur zum Teil zugänglich waren.

Es wurden flüssig prozessierbare Materialien entwickelt, die elektronische Funktionalitäten wie Leiter, Halbleiter²⁴, Isolatoren und Schutz Eigenschaften ermöglichen. Diese können zu Schichten unterschiedlicher Schichtdicke verarbeitet werden.

²³ vgl. Kapitel 4.2

²⁴ Materialien werden als Halbleiter bezeichnet, wenn deren elektrische Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand zwischen denen der Leiter und der Isolatoren liegt. Vgl. Tille/Schmitt-Landsiedel (2004).

Druckbare Elektronik beschreibt das Herstellen dünner Schichten²⁵ aus Funktionsfluiden, die als Schichtstapel bestimmte Funktionen und somit neuartige Anwendung ermöglichen.

Beispiele für diese neuen Anwendungen sind: OLED-Beleuchtung, intelligente Verpackungen, Smart Labels, RFID, Aktoren, flexible bzw. rollbare Displays, flexible Solarzellen und Batterien, Einweg-Diagnose-Vorrichtungen ...

Der eigentliche **Vorteil** dieser Technologie ist, dass die Materialien mit Druck- und Coating-Verfahren prozessiert werden können, wenn sie in Lösemittel verflüssigt werden.²⁶ Somit sind elektronische Komponenten in großer Menge und zu geringen Kosten produzierbar. Der Einsatz von Drucktechnologien ermöglicht gegenüber der gegenwärtigen Siliziumherstellung eine erhebliche Reduzierung der Herstellungskosten durch das sehr schnelle Bedrucken großflächiger und flexibler Substrate. Der druckbaren Elektronik werden folgende Vorteile zugeschrieben: Die Anwendungen können auf Grund der ultradünnen Materialschichten sehr dünn und leicht konzipiert werden. Werden diese dünnen Schichten mit flexiblen Substraten kombiniert, können die Produkte auch flexibel sein und sind somit sehr leicht in andere Objekte integrierbar.²⁷ Bei den organischen Materialien besteht die Hoffnung, dass diese deutlich ressourcenschonender hergestellt und auch ressourcenschonender verarbeitet werden können.²⁸

Nachteile der druckbaren Elektronik sind derzeit die Leistungsfähigkeiten der Materialien sowie die geringe Auflösung der Fertigungsverfahren. Das Leistungspotenzial der Materialien liegt deutlich unter Silizium. Viele Fertigungsverfahren wurden von dem graphischen Druck lediglich adaptiert. Dort wird die Auflösung durch die Wahrnehmung des Menschen vorgegeben. So kann das menschliche Auge nur Strukturen größer als etwa einigen Dutzend Mikrometer wahrnehmen. In der Silizium-industrie werden inzwischen Transistoren mit einer Kanallänge von 22 nm hergestellt und aktuelle Planungen sehen Transistoren mit einer Kanallänge von unter 5 nm vor.²⁹ Dies entspricht einer um drei Größenordnungen höheren Auflösung. Dies spielt vor allem bei der Leistungs-

²⁵ vgl. Kapitel 2.2.1

²⁶ Einige der funktionalen Materialien müssen nach wie vor im Vakuum aufgedampft werden.

²⁷ Denkbar ist die Integration von Smart Labels in Verpackungen oder von OLED-Beleuchtung in Möbel.

²⁸ Beispiel sind organische Solarzellen, deren EPBT deutlich unter der von siliziumbasierenden Solarzellen liegen. vgl. Espinosa/Garcia-Valverde/Krebs (2011); Espinosa/Garcia-Valverde/u. a. (2011); Espinosa/Garcia-Valverde/u. a. (2011); Espinosa u. a. (2012).

²⁹ vgl. Lee u. a. (2006); Shilov (2009).

fähigkeit von Devices³⁰ wie Transistoren und bei der Integrationsdichte eine entscheidende Rolle. Daher eignet sich bei den aktuellen Materialien und Herstellungsverfahren die druckbare Elektronik nicht für Anwendungen mit hohen Schaltfrequenzen und hoher Integrationsdichte.

Um erfolgreich zu sein, muss die druckbare Elektronik andere Märkte anvisieren. Denkbar wäre die sogenannte „Low-Cost-Elektronik“, die Anwendungen vorsieht, bei der die Leistungsfähigkeit der Silizium-Elektronik nicht erforderlich ist. Zum zweiten sind auch großformatige und flexible Anwendungen denkbar, da mit den Materialien und Fertigungsverfahren sehr große Funktionsflächen (bis einige m²) mit Beleuchtung, Solarzellen oder Sensoren herstellbar sind.

Der in dieser Arbeit bewusst gewählte Ausdruck **druckbare Elektronik** ist in der Community³¹ nicht sehr geläufig. Es existieren viele Begriffe für diese neue Technologie, die sich teilweise überschneiden: gedruckte Elektronik (printed electronics), organische Elektronik (organic ~), Plastik Elektronik (plastic ~), Polymer Elektronik (polymer ~), Flexible Elektronik (flexible ~), anorganische Elektronik (inorganic ~), Dünnschicht-Elektronik (thin-film ~) und Großflächen-Elektronik (Large area ~).³² Neuere Forschungen setzten die Technik der organischen Elektronik ein, um sogenannten bioelektronische Devices (bioelectronics applications) herzustellen, mit deren Hilfe elektronische Signale in Biosignale und zurück gewandelt werden können. Dabei wird von organischer Bioelektronik (Organic Bioelectronics) gesprochen.³³

Die beiden häufigsten Begriffe *organische Elektronik* und *gedruckte Elektronik* geben eine Einschränkung, die für diese Arbeit nicht sinnvoll ist. Während die organische Elektronik sämtliche anorganischen Materialien³⁴ ausschließt, fallen bei der gedruckten Elektronik alle anderen Fertigungstechnologien heraus. Der in dieser Arbeit betrachtete Produktionsprozess ist für organische wie auch für anorganischen Materialien anwendbar. Auch kann aus heutiger Sicht noch nicht eine Fertigungstechnologie mit Sicherheit ausgeschlossen werden; u. U. kom-

³⁰ Device beschreibt in dieser Arbeit funktionierendes Bauteil der druckbaren Elektronik, wie beispielsweise eine organische Solarzelle.

³¹ Community: engl. für Gemeinschaft. Meint hier eine Gruppe von Menschen mit Zusammengehörigkeitsgefühl oder gemeinsamen Interessen. Das gemeinsame Interesse besteht in diesem Falle in der druckbaren Elektronik mit all ihren Ausprägungsformen.

³² vgl. Clemens u. a. (2011).

³³ vgl. Berggren/Richter-Dahlfors (2007).

³⁴ Auch anorganische Materialien können in druckbares Fluid gebracht werden, so dass diese Materialien mit Druckverfahren verarbeitet werden können. Für weitere Informationen vgl. Mitzi (2008); Brazis u. a. (2008); Mitzi (2004).

men diese Technologien parallel oder sogar kombiniert als eine Art Hybridfertigung zum Einsatz. Der Ausdruck *druckbare Elektronik* (siehe Abb. 2.1) umgeht diese Eingrenzungen und bildet somit die Grundlage für diese Arbeit.

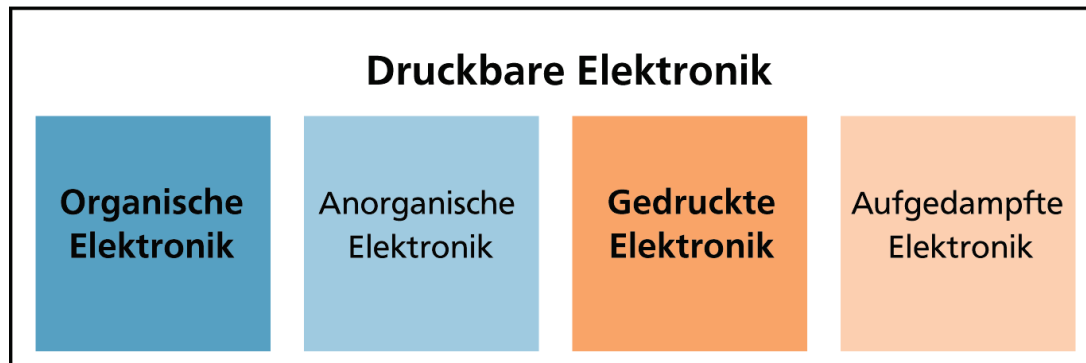


Abb. 2.1: Darstellung des Begriffs druckbare Elektronik

Die in dieser Arbeit gewählten Begriffe Drucken, Beschichten und Coaten sind bisher weder in der Community noch in der Wissenschaft exakt definiert und somit auch nicht voneinander abgrenzbar. Jede Community hat ihre eigene Definition. In dem Umfeld der druckbaren Elektronik kommen allerdings alle Verfahren zum Einsatz und für einen solchen Fall gibt es keinen übergeordneten Begriff. Gemeinsam ist den Verfahren, dass sie flüssige Materialien zu einer Schicht verarbeiten, weshalb auch von Flüssigphasen-Prozessierung gesprochen wird. Da diese Arbeit alle Verfahren betrachtet, aber den Fokus deutlich auf das Drucken legt, wird der Begriff Drucken in dieser Arbeit als Synonym für „Auftragen“ verwendet und beinhaltet somit auch andere Verfahren.³⁵

Generell lässt sich die Funktion der Materialien in Leiter, Halbleiter, Isolatoren und Verkapselung einteilen. Daraus leiten sich drei übergeordnete Klassen von Devices³⁶ ab: organische Photovoltaik - OPV³⁷, organische Leuchtdioden - OLED³⁸ und organische Feldeffekttransistoren - OFET.³⁹ Diese Einteilung ist bewusst sehr grob gewählt, weil damit die meisten Funktionen erklärt werden können. Es gibt allerdings noch deutlich mehr Möglichkeiten Devices aus diesen Materialien herzustellen. Beispiele sind: OLED-Beleuchtung (*OLED-Lighting*), OLED-Displays (*OLED Displays*), Elektronische Schaltungen (*Electro-*

³⁵ Eine umfassende Definition und Einteilung der Fertigungsverfahren ist in Kapitel 2.2.1 beschrieben.

³⁶ Der englische Begriff „Device“ kann in diesem Zusammenhang am besten mit Bauelement übersetzt werden. Dieser Begriff hat sich in der Community der druckbaren Elektronik etabliert und wird auch in der deutschen Sprache so verwendet.

³⁷ OPV: engl. für organic photo voltaic

³⁸ OLED: engl. für organic light emitting device

³⁹ OFET: engl. für organic field effect transistor

nic circuits), Batterien (*batteries*), Sensoren (*sensors*), Aktoren (*actuators*) intelligente Etiketten (*smart label*), intelligente Scheckkarten (*smart card*) und intelligente Textilien (*smart textile*).

Eine Definition dieser organischen Devices sieht vor, dass mindestens eine aktive Schicht aus organischem Material bestehen muss und alle anderen aus anorganischen Materialien bestehen können. In dieser Arbeit werden anorganische Funktionsfluide nicht ausgeklammert, da auch diese Funktionsfluide in einen druckbaren Zustand gebracht werden können, so dass sie aus Fertigungssicht ähnlich verarbeitet werden können. Trotzdem werden einfachheitshalber weiterhin die Begriffe OPV, OLED oder OFETs verwendet, wohl wissend, dass auch anorganische Funktionsfluide zum Einsatz kommen können, da diese Begriffe inzwischen sehr stark verbreitet sind.

Die **Geschichte** der halbleitenden Eigenschaften der organischen Materialien begann mit der Entdeckung der halbleitenden Eigenschaften von organischen Stoffen in den späten 1940er Jahren.⁴⁰ 1977 zeigten die Chemiker Alan Heeger, Alan MacDiarmid und Hideki Shirakawa die Leitfähigkeit des Polymers Polyacetylen.⁴¹ An organischen Transistoren wurde vor allem ab Ende der 80iger Jahre gearbeitet. Zu dieser Zeit wurden bereits Halbleiter aus Polymeren und aus Small Molecules untersucht.⁴² Über die letzten Jahrzehnte konnten die Materialkennwerte deutlich verbessert werden, so dass sich neben der wissenschaftlichen Forschung, auch immer mehr Unternehmen an der Forschung beteiligten. Daraus resultierte ein kontinuierliches Steigen der Ladungsträgermobilitäten⁴³ in den letzten Jahrzehnten von $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ bis hin zu $10^1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.⁴⁴

Zu Beginn wurden die Materialien vor allem im Aufdampfverfahren aufgebracht. Die Löslichkeit von Polymerhalbleitern in Lösemittel eröffnete neue Möglichkeiten in der Herstellung von Devices.⁴⁵ Daraufhin wurde meistens das Spincoating-Verfahren eingesetzt. 1994 wurde der erste gedruckte Transistor vorgestellt.⁴⁶ Die ersten Druckverfahren waren vor allem Siebdruck und Inkjet-

⁴⁰ vgl. Dimitrakopoulos/Malenfant (2002).

⁴¹ vgl. Shirakawa u. a. (1977).; vgl. Shirakawa/McDiarmid/Heeger (2003).

⁴² vgl. Klauk (2006).

⁴³ vgl. Kapitel 2.1.3

⁴⁴ vgl. Dimitrakopoulos/Malenfant (2002), S. 101.

⁴⁵ vgl. Knobloch u. a. (2004).

⁴⁶ vgl. Garnier u. a. (1994).

Verfahren. Viele Forscher verbinden mit den Druckverfahren eine Möglichkeit, Elektronik sehr schnell und somit sehr günstig fertigen zu können.⁴⁷

In dem nächsten Abschnitt werden die wichtigsten Devices OPV, OLED und OFET im Detail vorgestellt. Die organische Photovoltaik wird ausführlicher dargestellt. Redundante Informationen werden bei OLED oder OFETs nicht noch einmal beschrieben.

2.1.1. Organische Photovoltaik (OPV)

Die Beschreibung von OPV⁴⁸ orientiert sich an der folgenden Gliederung: 1) Funktionsweise, 2) Materialien, 3) Aufbau, 4) Leistungskennzahlen, 5) Herstellverfahren und 6) Anwendungen.

Funktionsweise

Photovoltaik-Zellen wandeln (Sonnen-) Licht in elektrische Energie um. Um das möglichst effizient zu gestalten, muss möglichst viel Licht absorbiert und effizient umgewandelt werden. Für die Funktion sind die Eigenschaften des Halbleiters von entscheidender Bedeutung. Halbleitermaterialien sind nur leitend, wenn sich Elektronen im Leitungsband befinden. Bei Halbleitern muss dem Material erst Energie zugeführt werden, damit die Bandlücke von den Elektronen überwunden werden kann.

Diese Energie bringen in Solarzellen die Photonen ein. Diese treffen auf den Halbleiter und übertragen dabei ihre Energie auf ein Atom. Das im Valenzband absorbierte Licht hebt das Elektron in das Leitungsband. Im Leitungsband kommt dadurch ein Elektron hinzu und im Valenzband ein Loch. Dieses Elektron-Loch-Paar wird Exziton genannt. Die Exzitonen können kurze Strecken innerhalb des Schichtverbundes diffundieren. Wenn die vom Photon eingebrachte Energie groß genug ist, erreichen die Exzitonen die Grenzfläche von n- und p-Halbleiter. An dieser Grenzfläche können sich das Elektron und das Loch trennen und aus dem Verbund lösen.⁴⁹ Die beiden Halbleiterschichten können jeweils entweder das entstandene Elektron oder das Loch leiten und der Kathode und Anode zuführen. Dann fließt ein Strom.⁵⁰

⁴⁷ vgl. Horowitz (2004).; vgl. Dimitrakopoulos/Malenfant (2002).

⁴⁸ Von organischen Solarzellen spricht man, wenn die lichtabsorbierende Schicht zumindest ein organisches Material enthält. Die anderen Schichten wie die Elektroden können aus Metall oder anderen Materialien sein.

⁴⁹ vgl. Konstantin (2009).

⁵⁰ Weitere Informationen zur Funktionsweise von OPV und zu den verwendeten Materialien vgl. Sun u. a. (2008); Krebs (2010); Brabec/Dyakonov/Scherf (2008); Sun/Sariciftci (2005).

Photovoltaikzellen lassen sich zum einen nach dem Material (Anorganisch, Organisch oder Hybrid), nach der Schichtdicke (Dünnschicht und Dickschicht) sowie nach dem Zellaufbau (normal und invertiert) unterscheiden.⁵¹ In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der organischen Photovoltaik während die anderen Arten von Photovoltaik nicht näher betrachtet werden. Eine OPV-Zelle besteht aus mehreren übereinander liegenden Schichten. Die lichtabsorbierende Schicht mit p- und n-Halbleiter wird dabei von zwei metallischen Elektroden eingerahmt.⁵² Eine dieser Elektroden muss transparent sein, damit das Licht in die aktive Schicht eindringen kann. Je nach Aufbau muss auch das Substrat transparent sein (vgl. Abb. 2.8).

Trifft das Photon auf ein Atom der lichtabsorbierenden Schicht, wird nicht unmittelbar ein Ladungsträgerpaar erzeugt, sondern führt im organischen Halbleiter zu neutralen Anregungszuständen, den so genannten *Frenkel-Exzitonen*. Diese Elektronen-Loch-Paare werden noch durch eine relativ hohe Bindungsenergie von einigen Elektronenvolt (0,3-1,4 eV)⁵³ zusammengehalten, während die Bindungsenergie in Silizium nur wenige Millielektronenvolt beträgt.⁵⁴ Das Phänomen trägt dazu bei, dass die Energieeffizienz bei organischen Solarzellen niedriger als bei Silizium-Solarzellen ausfällt. Die meisten organischen Solarzellen basieren heute auf dem Donor-Akzeptor-Prinzip. Diese Stoffe besitzen zueinander verschobene Energieniveaus bzw. verschobene elektrochemische Potentiale der Valenzelektronen, die auch als HOMO-⁵⁵ und LUMO-Niveaus⁵⁶ bezeichnet werden. Der Transfer des Elektrons kann auf den Akzeptor erfolgen, wenn die Differenz der Niveaus größer als die Bindungsenergie des Exzitons ist.⁵⁷ Das Exziton wird an der Grenzfläche zwischen Donor und Akzeptor getrennt. Das Elektron kann im Akzeptor auf ein niedriges Energieniveau übergehen.

Die coulombsche Anziehungskraft zwischen Elektron und Loch wird durch das zwischen den Elektroden wirkende elektrische Feld überwunden.⁵⁸ So kann das

⁵¹ vgl. Heßberger (2012).

⁵² vgl. Kippelen/Brédas (2009).

⁵³ vgl. Li/Zhu/Yang (2012).

⁵⁴ vgl. Dyakonov/Pfeiffer (2003).

⁵⁵ HOMO steht für Highest Occupied Molecular Orbital und bezeichnet das höchste besetzte Orbital im Molekül; vgl. Sun u. a. (2008).

⁵⁶ LUMO steht für Lowest Unoccupied Molecular Orbital und bezeichnet das niedrigste unbesetzte Orbital im Molekül; vgl. Sun u. a. (2008).

⁵⁷ vgl. Ameri u. a. (2009).

⁵⁸ vgl. Deibel/Dyakonov (2010).

Elektron über den Akzeptor abwandern, während das Loch über das Donormaterial abfließt. Das Wandern der Ladungsträger zu den Elektroden erzeugt einen Stromfluss (s. Abb. 2.2).

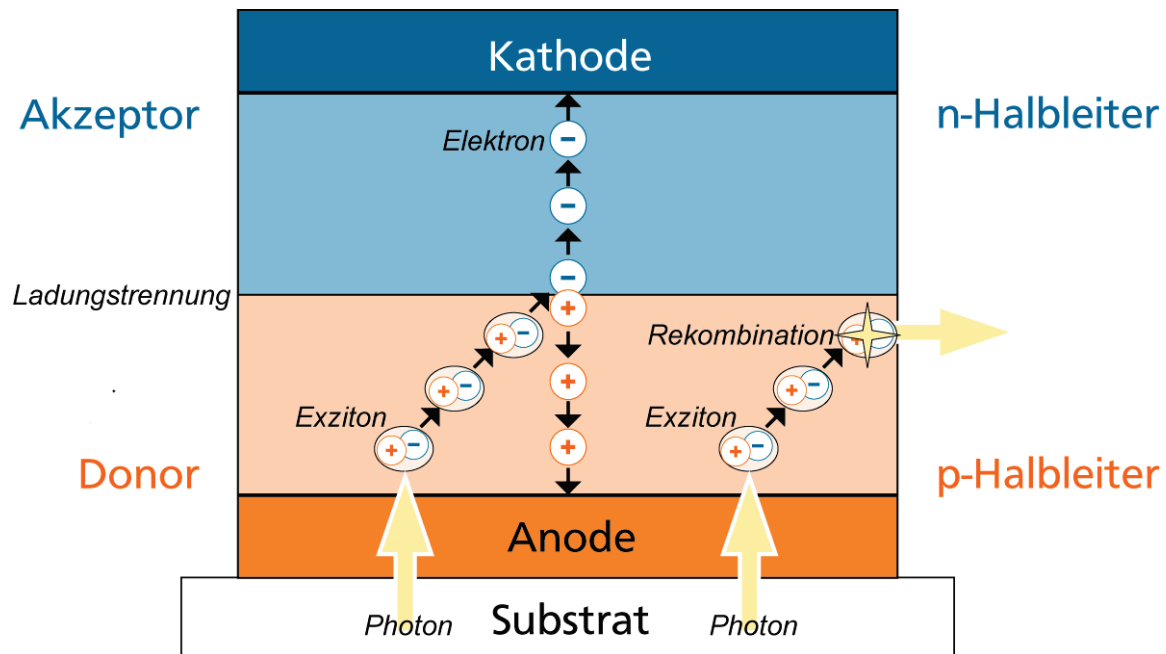


Abb. 2.2: Prinzip der Ladungstrennung in einer OPV-Zelle
Quelle: In Anlehnung an Kietzke (2007)

Da die Trennung nur an einer Grenzfläche von Donor und Akzeptor möglich ist, müssen die Exzitonen sehr nahe an der Grenzfläche entstehen. Die übliche Diffusionslänge⁵⁹ eines Exzitons beträgt typischerweise 5 bis 10 nm. Erreicht ein Exziton diese Grenzfläche nicht, kommt es zu einer Rekombination des Elektrons und des Loches und somit unter Umständen zu einer Emission von Licht.⁶⁰ Allerdings zeichnen sich organische Halbleiter durch sehr gute Absorptionseigenschaften aus. Die Absorptionslänge⁶¹ liegt in etwa bei 100 nm.⁶²

Die entscheidenden Eigenschaften des Halbleiters einer Solarzelle sind somit die Absorptionseigenschaften, die Leitfähigkeit und die Diffusionslängen der Exzitonen.

⁵⁹ Die Diffusionslänge ist die Wegstrecke, die ein Ladungsträger im Halbleiter zurücklegen kann, bis er wieder rekombiniert.

⁶⁰ vgl. Kietzke (2007).

⁶¹ Absorptionslänge bezeichnet die Dicke, die eine Schicht vorweisen muss, um elektromagnetische Strahlung bis auf einen gewissen Restwert absorbieren zu können.

⁶² vgl. Brutting/Rieß (2008).

Materialien

Organische Materialien bestehen aus chemischen Verbindungen des Kohlenstoffatoms. Die organischen Halbleiter werden dabei in zwei Klassen unterteilt: kleine Moleküle und Polymere.

Kleine Moleküle (engl. small molecules) bezeichnet Materialien mit definiertem geringem Molekulargewicht. Kleine Moleküle werden typischerweise mit Aufdampfverfahren verarbeitet, wobei neuere Forschungen zeigen, dass auch kleine Moleküle mit Lösemittel in druckbare Fluide umgesetzt werden können und somit auch verdruckt werden können.⁶³ *Polymere* wurden lange Zeit generell mit Isolatoren gleichgesetzt, bis die Forscher Heeger, Shirakawa und Macdiarmid bei Polymeren eine elektrische Leitfähigkeit bzw. ein typisches Halbleiterverhalten nachwiesen.⁶⁴ Bei den Polymeren handelt es sich um langkettige Moleküle aus Kohlenstoffketten oder -ringen, die aus 10^3 bis 10^5 Monomeren bestehen und somit ein hohes Molekulargewicht besitzen.⁶⁵ Polymere sind in bestimmten Lösemitteln lösbar, und können daher mit flüssigkeitsbasierten Beschichtungsverfahren zu dünnen Schichten verarbeitet werden. Da Polymere meist nicht sehr hitzebeständig sind und auch keinen passenden Dampfdruck besitzen, können sie nicht mit Aufdampfverfahren verarbeitet werden. Kombinationen aus Polymer-Halbleitern mit konjugierten Kohlenstoffbindungen und Small-Molecule-Halbleiter für Solarzellen wurden bereits 1991 untersucht.⁶⁶ Die Verbindung von P3HT⁶⁷ als p-Halbleiter⁶⁸ mit Fulleren-Derivaten⁶⁹ als n-Halbleiter⁷⁰ ergab eine überraschend hohe Effizienz, so dass die Forschung ausgedehnt wurde. Dabei entstand das PCBM⁷¹, welches als Akzeptor-Material verwendet wird. Als Donor wird bis heute das P3HT verwendet.⁷²

Aufbau

Schottky-Typ

Die ersten OPV hatten einen sehr einfachen Aufbau: sie bestanden aus einer organischen Schicht, die von zwei metallischen Schichten umgeben wurde (vgl.

⁶³ vgl. Rand u. a. (2007).;

⁶⁴ vgl. Shirakawa/McDiarmid/Heeger (2003).; vgl. Shirakawa u. a. (1977).

⁶⁵ vgl. Ivers-Tiffée/Münch (2007).

⁶⁶ vgl. Sariciftci u. a. (1992).

⁶⁷ P3HT steht für Poly(3-hexylthiophen)

⁶⁸ Ein p-Halbleiter transportiert bevorzugt Löcher.

⁶⁹ Fulleren zählt zu den kleinen Molekülen

⁷⁰ Ein n-Halbleiter transportiert bevorzugt Elektronen.

⁷¹ PCBM steht für [6,6]-phenyl-C61 acid methyl ester; auf Deutsch: [6,6]-Phenyl-C61-buttersäuremethylester

⁷² vgl. Kietzke (2007).

Abb. 2.3). Die Ladungstrennung der Exzitonen konnte nur an den Grenzflächen des Halbleiters zu den metallischen Schichten stattfinden. Die Grenzfläche ist bei diesem Aufbau sehr klein. Des Weiteren erreichten nur wenige Exzitonen die Grenzfläche, da diese nur einige Nanometer in den Schichten wandern konnten.⁷³ Die Exzitonen-diffusionslänge ist sehr klein. Typische Exzitonendiffusionslänge liegt in etwa bei 5-10 nm.⁷⁴ Dieser Aufbau gilt daher als sehr ineffizient.

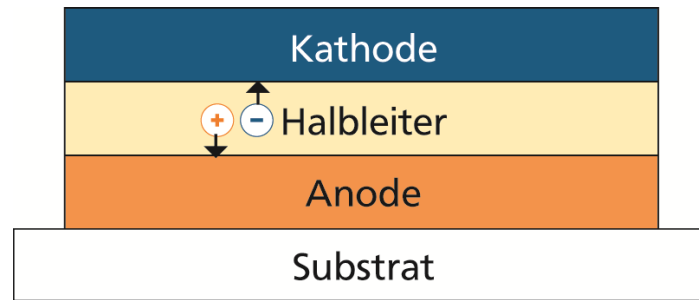


Abb. 2.3: Aufbau einer organischen Solarzelle des Schottky-Typs

Heterojunction

Mit Heteroübergang ist die Grenzschicht zweier unterschiedlicher Halbleitermaterialien gemeint und wird auch als p-n-Übergang bezeichnet. Somit kommen anders als beim Schottky-Typ, zwei halbleitende Materialien zum Einsatz. Gegenüber einem Schottky-Übergang,⁷⁵ bestehen bei einem Heteroübergang beide Schichten aus unterschiedlichen halbleitenden Materialien (vgl. Abb. 2.4).

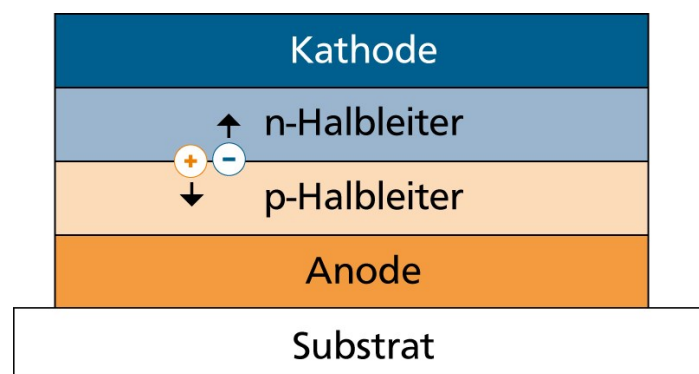


Abb. 2.4: Aufbau einer organischen Solarzelle des Heterojunction-Typs

⁷³ vgl. Lane/Kafafi (2005).

⁷⁴ vgl. Halls u. a. (1996); Pettersson/Roman/Inganas (1999); Stübinger/Brütting (2001).

⁷⁵ Von einem Schottky-Übergang spricht man, wenn kein p-n-Übergang (Halbleiter-Halbleiter-Übergang) sondern einen Metall-Halbleiter-Übergang vorliegt.

Die Ladungstrennung findet an der Grenzfläche zwischen den beiden Halbleitern statt. Befindet sich das Exziton in der Nähe der Grenzfläche, können die Ladungen getrennt werden und es findet ein Ladungstransport statt. Die Exzitonen werden im Feld der Raumladungszone⁷⁶ getrennt und zu den Kontakten transportiert. Die Grenzfläche wirkt dabei wie eine Barriere, die von Elektronen nur in eine Richtung passiert werden kann. Die Ladungstrennung direkt in der aktiven Schicht ist bedeutend effizienter, als es bei dem Schottky-Typ der Fall ist.⁷⁷

Bulk-Heterojunction

Solarzellen des Heterojunction-Typs haben den Nachteil, dass nur an der relativ kleinen Grenzfläche der Halbleiter eine Ladungstrennung stattfinden kann. Außerdem erreichen Exzitonen die Grenzfläche erst gar nicht, wenn sie zu weit von der Grenzfläche entstehen. Eine Verringerung der Schichtdicke würde die notwendige Diffusionslänge verkleinern, aber würde auch die Menge der absorbierten Photonen verringern. Eine Lösung für diese Probleme zeigt der Bulk-Heterojunction-Aufbau. Dies ist ein Netzwerk aus Donor- und Akzeptor-Material, wodurch die Grenzfläche deutlich vergrößert werden kann. Dabei werden die beiden Halbleiter-Materialien vermischt aufgebracht. Somit kann die Grenzfläche deutlich vergrößert werden, ohne die Schichtdicke verringern zu müssen. Die Wahrscheinlichkeit, dass Exzitonen in der Nähe einer Grenzfläche in ihre Ladungen aufgespalten werden, steigt erheblich.⁷⁸

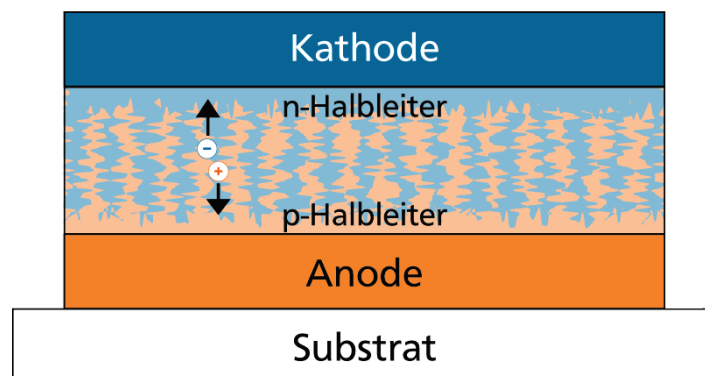


Abb. 2.5: Aufbau einer organischen Solarzelle des Bulk-Heterojunction-Typs

⁷⁶ Eine Raumladungszone ein Bereich in Halbleitern, in dem sich zum einen Überschuss und Mangel an Ladungsträgern gegenüberstehen. Diese Zone erscheint nach außen ladungsneutral.

⁷⁷ vgl. Lane/Kafafi (2005).

⁷⁸ vgl. Hoppea/Sariciftci (2004).; vgl. Lane/Kafafi (2005).

Tandem- oder Multijunction-Zellen

Bis heute ist kein organisches Material bekannt, welches über den gesamten Wellenlängenbereich des Sonnenspektrums absorbiert. Daraus ist die Idee entstanden, Materialien mit unterschiedlichen Absorptionsspektren zu stapeln, um somit mehr Photonen im Halbleiter einzufangen.⁷⁹ So beinhaltet eine Tandemzelle mindestens zwei Subzellen, welche kombiniert ein breites Spektrum absorbieren und so einen höheren Wirkungsgrad erreichen können.⁸⁰ Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen, werden die Subzellen nach dem Bulk-Heterojunction-Prinzip aufgebaut (s. Abb. 2.6). Während das Shockley-Queisser-Limit⁸¹ bei 30% liegt, steigt diese theoretisch erreichbare Effizienz für eine Tandemzelle auf 42%. Mit drei Subzellen steigt diese Effizienz auf 49%.⁸² Es existieren viele Möglichkeiten Tandemzellen herzustellen. Hadipour, de Boer und Blom geben einen Überblick über diese Zellarchitekturen.⁸³

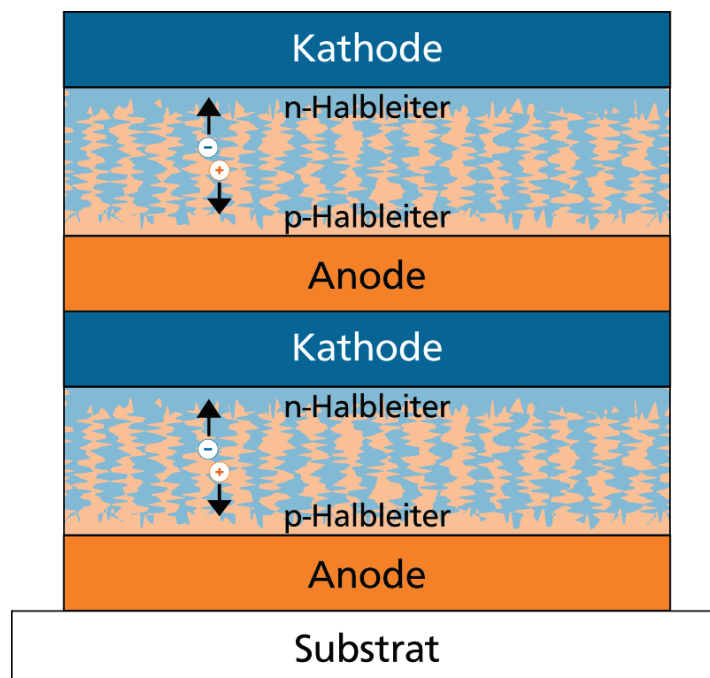


Abb. 2.6: Aufbau einer organischen Solarzelle des Tandem-Typs

⁷⁹ vgl. Kim u. a. (2007).

⁸⁰ vgl. Kietzke (2007).

⁸¹ Das Shockley-Queisser-Limit ist die maximal erreichbare Effizienz einer einfachen Solarzelle unter nicht konzentrierten Sonnenlicht; vgl. Shockley/Queisser (1961).

⁸² vgl. Ameri u. a. (2009).

⁸³ vgl. Hadipour/de Boer/Blom (2008).

Abb. 2.7 zeigt die verschiedenen Zelltypen der (organischen) Photovoltaik. Die Wirkungsgrade der Solarzellen konnte durch verbessern der Zellarchitektur deutlich gesteigert werden, während die Komplexität stetig zunahm.

Die ersten Untersuchungen zu organischen Solarzellen wurden 1954 durchgeführt, als die Leitfähigkeit von halogen dotierten organischen Verbindungen gefunden wurde.⁸⁴ 1975 wurden die ersten organischen Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 0,001% vorgestellt.⁸⁵ In den folgenden Jahren wurden die Materialien kontinuierlich verbessert, und so wurde 1986 eine Effizienz von 1%⁸⁶ und in 2006 von 5,5%⁸⁷ erreicht. Der aktuelle Rekord organischer Photovoltaik von aufgedampften Solarzellen von Heliatek liegt bei 10,7%⁸⁸ und bei gedruckten Solarzellen von Konarka bei 9,0% und von Polyera bei 9,1%.⁸⁹ Eine von Polyera gedruckte Solarzelle, bei der auch der Akzeptor aus Polymeren besteht, erreicht eine Effizienz von 5,2%.⁹⁰

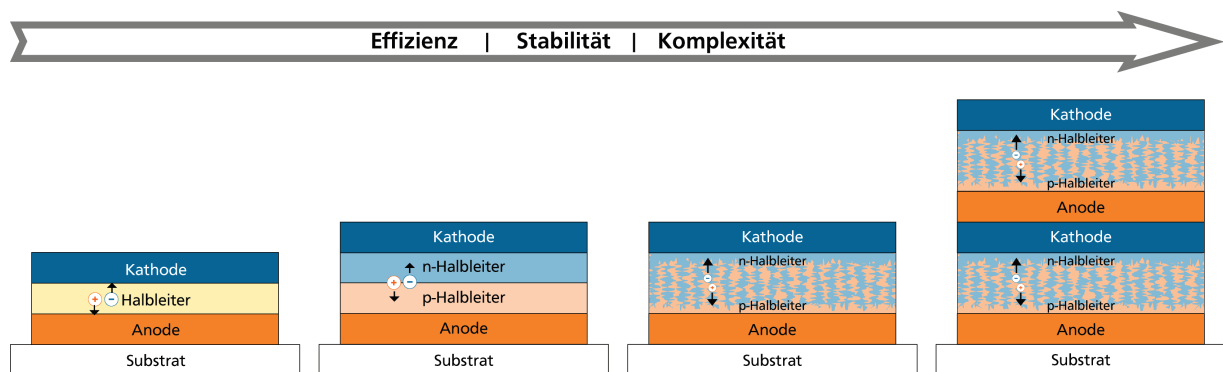


Abb. 2.7: Aufbau und Entwicklung organischer Photovoltaikzellen

Klassischer und invertierter Aufbau

Um einen Lichteinfall in die Solarzelle zu ermöglichen, muss eine der beiden Elektroden aus transparentem Material bestehen. Als klassischen Aufbau werden die Zellen mit transparenter Anode bezeichnet. Hierfür wird meist ITO⁹¹ als elektronenabsorbierende Anode verwendet. Als Kathode wird ein Metall mit geringer Austrittsarbeit (meistens mit Kalzium dotiertes Aluminium) eingesetzt,

⁸⁴ vgl. Akamatu/Inokuchi/Matsunaga (1954).

⁸⁵ vgl. Tang/Albrecht (1975).

⁸⁶ vgl. Tang (1986).

⁸⁷ vgl. Xue u. a. (2004).

⁸⁸ vgl. Heliatek GmbH (2012); Müller-Meskamp u. a. (2012).

⁸⁹ vgl. o A (2012c); o A (2012b).

⁹⁰ vgl. o A (2012e).

⁹¹ ITO steht für Indiumzinnoxid

welches aufgedampft werden muss. Dieser Aufbau ist historisch bedingt, und nicht durch systematische Forschung entstanden.⁹² Damit eine organische Solarzelle komplett gedruckt werden kann, muss der Aufbau geändert und die Metallschicht ersetzt werden. So sind heute Architekturen bekannt, welche das ITO Material durch ein sehr feines Gitter aus hochleitfähigem Silber ersetzen, das zusätzlich mit einer organischen leitfähigen PEDOT:PSS⁹³-Schicht unterstützt wird.

Neben dem klassischen Aufbau sind auch noch andere Geometrien möglich. Wie Abb. 2.8 zeigt, können die Geometrien nach dem Lichteinfall und der Richtung der Elektrodenwanderung unterschieden werden.

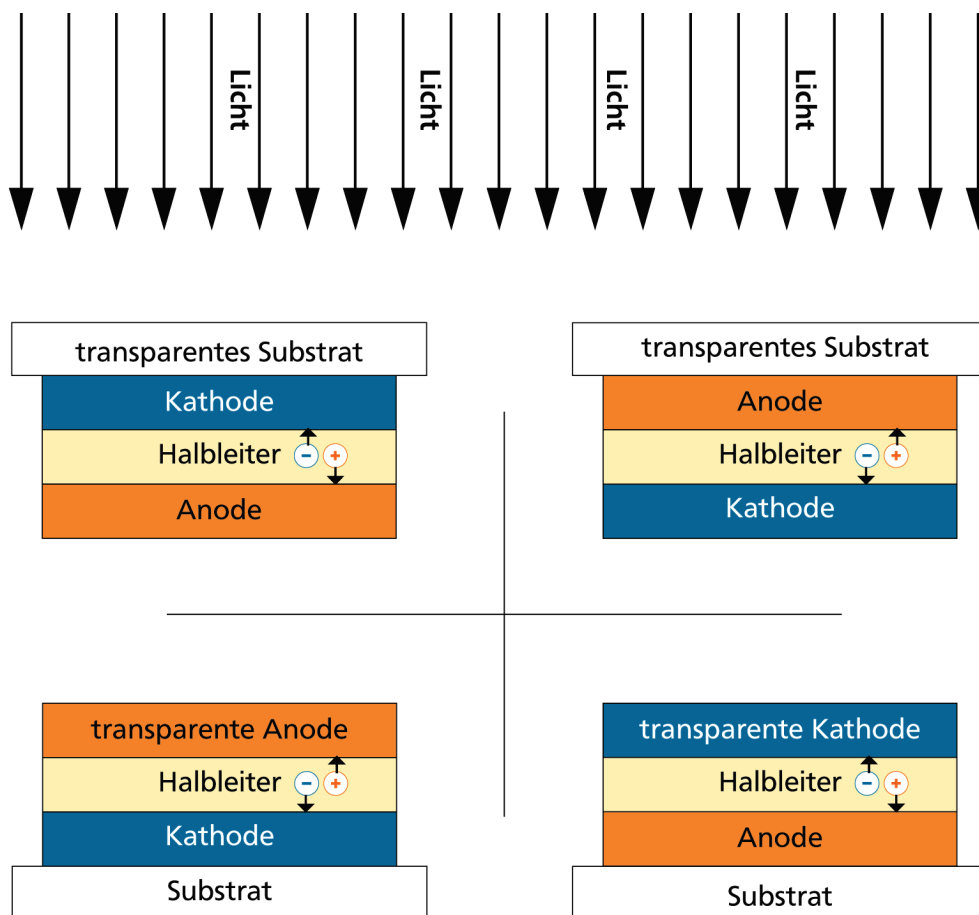


Abb. 2.8: Mögliche Geometrien von organischen Photovoltaikzellen
Quelle: In Anlehnung an Krebs/Gevorgyan/Alstrup (2009)

⁹² Krebs/Gevorgyan/Alstrup (2009).

⁹³ PEDOT:PSS steht für (Poly(3,4-ethyldioxythiophen):Polystyrolsulfonat)

Beim invertierten Aufbau verläuft der Elektronenfluss entgegengesetzt zum Fluss beim klassischen Aufbau. So kann auch ein nicht transparentes Substrat verwendet werden, wenn das Licht durch die gedruckte Topelektrode in die aktive Schicht eindringt.

Leistungskennzahlen

Zur Beurteilung von organischen Solarzellen werden unter anderen folgende Kennzahlen genutzt:

Leerlaufspannung V_{oc}

(V_{oc} = Open Circuit Voltage). Bei der Leerlaufspannung handelt es sich um die maximale Spannung eines Moduls, welche auftritt, wenn kein Verbraucher angeschlossen ist und somit kein Strom fließt.⁹⁴ Die Höhe der elektrischen Leerlaufspannung V_{oc} , die eine Solarzelle bei Bestrahlung mit Licht abgibt, hängt von der Elektronenaffinität der beiden Halbleiter, der Temperatur sowie der Lichtintensität und dem Lichtspektrum ab. Sie ist allerdings nicht von der Fläche abhängig.

External quantum efficiency (EQE)

Die externe Quanteneffizienz gibt die Effizienz an, mit der die Solarzelle aus Photonen Ladungsträger erzeugt und abtransportiert. Die EQE berechnet sich aus der Anzahl der Elektronen pro Zeit und pro Fläche, die die Solarzelle verlassen, geteilt durch die Anzahl der Photonen, die in der gegebenen Zeit auf diese Fläche treffen.⁹⁵

$$EQE = \frac{\text{Elektronen/Zeit} \times \text{Fläche}}{\text{Photonen/Zeit} \times \text{Fläche}} \quad \text{Formel 2.1}$$

Maximum power point (MPP)

Der Maximum Power Point ist der Punkt des Strom-Spannungs-Diagramms einer Solarzelle, an dem die größte Leistung entnommen werden kann. An diesem Punkt ist das Produkt von Strom und Spannung am größten. In Abb. 2.9 ist dieser als MPP gekennzeichnet.

⁹⁴ Hunklinger (2009). vgl. Chan/Tao/Yam (2010).

⁹⁵ vgl. Li/Zhu/Yang (2012).

Internal quantum efficiency (IQE)

Die Interne Quanteneffizienz ähnelt der externen Quanteneffizienz, berücksichtigt aber zusätzlich noch die Verluste an Photonen durch Transmission und Reflektion an und in der Solarzelle. Eine geringe interne Quanteneffizienz sagt folglich aus, dass die Solarzelle nicht effizient in der Umwandlung von Photonen in Elektronen ist. Um die interne Quanteneffizienz zu messen, wird erst die EQE gemessen, und davon die gemessene Transmission und Reflektionen abgezogen.

$$IQE = \frac{\text{Elektronen/Zeit} \times \text{Fläche}}{\text{absorbierte Photonen/Zeit} \times \text{Fläche}} \quad \text{Formel 2.2}$$

Geometric fill factor (GFF)

Der geometrische Füllfaktor beschreibt, den Anteil aktiver Fläche an der Gesamtfläche einer Solarzelle. Der geometrische Füllfaktor ist also der Quotient der aktiven Fläche zu der Gesamtfläche der Solarzelle.⁹⁶

$$GFF = \frac{\text{aktive Fläche einer Solarzelle}}{\text{Gesamtfläche einer Solarzelle}} \quad \text{Formel 2.3}$$

Fill factor (FF in %)

Der Füllfaktor (FF) beschreibt den Quotienten aus der maximalen Leistung einer Solarzelle (am Maximum Power Point) und dem Produkt aus der Leerlaufspannung V_{OC} und dem Kurzschlussstrom I_{SC} . Der Füllfaktor bezeichnet folglich die Leistungsfähigkeit einer Solarzelle für die Leistungsabgabe.⁹⁷ Der Füllfaktor ist dimensionslos.

$$FF = (V_m I_m) / (V_{OC} I_{OC}) \quad \text{Formel 2.4}$$

Wie in Abb. 2.9 dargestellt, ist der Füllfaktor das Verhältnis von blauer zu orangener Fläche. Eine ideale Solarzelle stellt bis zu ihrer Maximalspannung eine Konstantstromquelle dar und der Füllfaktor wäre gleich eins. Allgemein lässt sich sagen, dass je niedriger der Füllfaktor, desto niedriger ist auch der Wirkungsgrad der Solarzelle, da ein Teil der erzeugten Leistung am Innenwi-

⁹⁶ vgl. Krebs/Tromholt/Jorgensen (2010).

⁹⁷ vgl. Kymakis/Amaratunga (2002). vgl. Chan/Tao/Yam (2010).

derstand der Zelle verloren geht. Erreichbare Werte für den Füllfaktor liegen je nach System für organische Photovoltaikzellen bei bis zu 0,7.⁹⁸

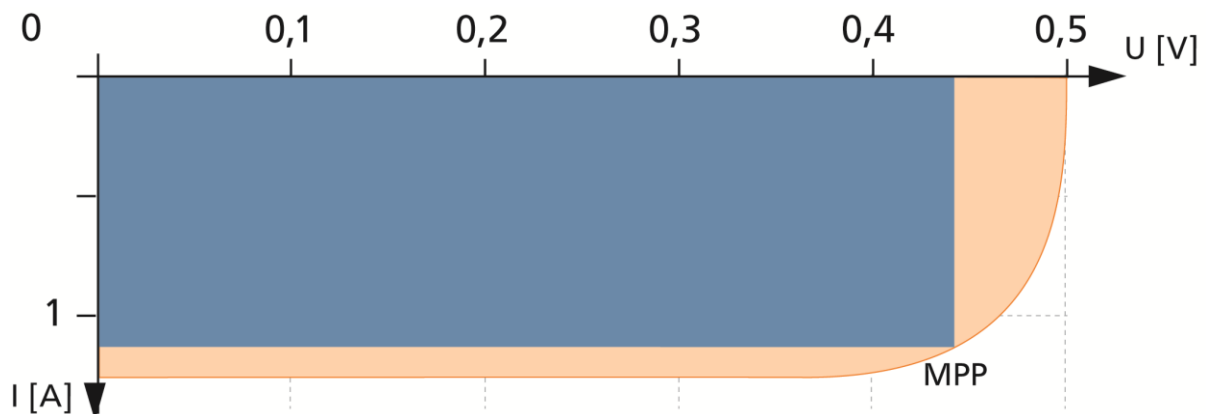


Abb. 2.9: Füllfaktor (blaue Fläche) einer organischen Solarzelle.

Kurzschlussstrom I_{sc}

(I_{sc} = Short Circuit current). Der Kurzschlussstrom beschreibt die Stromstärke einer Solarzelle, die dann anliegt, wenn beide Pole ohne einen Widerstand in Reihe mit einem Strommesser geschaltet sind. Die Höhe der maximalen Stromstärke ist abhängig von dem Halbleitermaterial, der Qualität der Solarzelle, der Fläche und der Lichtintensität. Der Kurzschlussstrom ist linear abhängig von der Bestrahlungsstärke.⁹⁹

Effizienz η - power conversion efficiency (PCE) (in %)

Power conversion efficiency (PCE) ist einer der wichtigsten Parameter von komplett montierten Solarzellen und ist auch bekannt als solar cell efficiency oder energy conversion efficiency (η_e). Die PCE beschreibt die Leistung einer Solarzelle bei genormten Bedingungen und ist der Quotient aus der gelieferten elektrischen Leistung und der investierten Lichtleistung. Sie berechnet sich aus der maximalen Leistung P_{mpp} geteilt durch die aktive Fläche der Solarzelle und der Bestrahlung von $P_{in} = 100 \text{ mW/cm}^2$.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{mpp}}{P_{in} \cdot A_c} \quad \text{Formel 2.5}$$

⁹⁸ Bei kristallinen Solarzellen werden Werte zwischen 0,75 und 0,85 erreicht, bei amorphen Zellen liegt der Füllfaktor zwischen 0,5 und 0,7; vgl. Kietzke (2007).

⁹⁹ vgl. Hunklinger (2009). vgl. Chan/Tao/Yam (2010).

Incident photon to converted electron efficiency (IPCE)

Der IPCE Wert ist ein Maß für die Effizienz der Stromerzeugung aus einem Photonenstrom in Solarzellen in Abhängigkeit der Wellenlänge.¹⁰⁰ Der Wert gibt an, bei welcher Wellenlänge die Absorption am größten ist.

$$\text{IPCE} = \text{LHE} (\gamma) = \frac{\# \text{ extrahierte Elektronen}}{\# \text{ auftreffende Photonen}} \quad \text{Formel 2.6}$$

Light harvesting efficiency (LHE)

Die Lichtsammeleffizienz, Light harvesting efficiency (LHE), beschreibt die Effizienz der Absorption der eingestrahlten Lichtquanten durch den Halbleiter. Die Größe ist abhängig von der Wellenlänge des Lichts sowie den Absorptionseigenschaften des Materials.¹⁰¹

Zell-Effizienz vs. Moduleffizienz

Bei der Zell-Effizienz wird die Effizienz einer einzigen hergestellten Solarzelle gemessen, während bei der Modul-Effizienz die Effizienz eines kompletten Moduls gemessen wird. Ein Modul besteht dabei aus mehreren montierten Solarzellen.¹⁰²

Lifetime

Die Lebensdauer gibt die Zeit an, nach der die Effizienz einer Solarzelle einen definierten Wert unterschreitet. Üblich sind Angaben, bis die Effizienz auf 50% (T_{50}) oder 70% (T_{70}) des ursprünglichen Wertes gesunken ist. Für Low-Cost Anwendungen gilt für einen Markteintritt eine minimale Lebensdauer von drei bis fünf Jahren, was in etwa einer operativen Lebensdauer bis 5000 Stunden entspricht.¹⁰³

Energy Pay Back Time (EPBT)

Die EPBT ist ein Maß dafür, wie lange es dauert, bis die Energie, die zur Herstellung einer Solarzelle aufgewendet wurde, wieder aus Sonnenlicht in elektrische Energie umgewandelt wird.¹⁰⁴

¹⁰⁰ vgl. Chan/Tao/Yam (2010).

¹⁰¹ vgl. O'Regan/Grätzel (1991).

¹⁰² vgl. Krebs/Fyenbo/Jorgensen (2010); Krebs/Gevorgyan/Alstrup (2009).

¹⁰³ vgl. Brabec u. a. (2005).

¹⁰⁴ vgl. Espinosa/Garcia-Valverde/Krebs (2011).

Herstellungsverfahren

Für die Herstellung organischer Solarzellen können aktuell vor allem zwei grundlegende Verfahren unterschieden werden. Solarzellen können zum einen aus der Flüssigphase gedruckt werden, oder aus der festen Phase aufgedampft werden. Möglich sind auch Kombinationen aus Herstellverfahren.

Für die Produktion sind mehrere Prozessvarianten denkbar. Je nach Aufbau muss eine unterschiedliche Anzahl an Schichten aufgebracht werden. Innerhalb eines Aufbaus ist die Reihenfolge der Schichten und somit auch der Herstellungsprozesse vorgegeben. Einige Firmen beschäftigen sich bereits mit der Herstellung von organischen Solarzellen. Die Firmen Konarka, welche am 01.06.2012 Insolvenz anmeldete, hatte bereits seit 2009 eine Fertigungsanlage in Betrieb genommen. Die Firma Heliatek plant organische Solarzellen in einem Roll-to-Roll Aufdampfverfahren herzustellen.

In dieser Arbeit können nicht alle möglichen oder bereits betrachteten Kombinationen vorgestellt werden. In Kapitel 3.1 wird der Produktionsprozess von organischer Photovoltaik in einer allgemeinen Form beschrieben.

Anwendungen

Die Anwendungsgebiete für organische Solarzellen sind sehr vielfältig. Zum einen ist es denkbar, die organischen Solarzellen fast überall dort einzusetzen, wo heute bereits siliziumbasierte Solarzellen zum Einsatz kommen. Allerdings müssen hierfür der Wirkungsgrad und die Haltbarkeit deutlich verbessert werden, damit die Kosten für den erzeugten Strom gesenkt werden kann. Abb. 2.10 zeigt, in welchen Ländern sich der Einsatz von Photovoltaik lohnt, damit diese mit den Herstellkosten der konventionellen Energieerzeugung konkurrieren kann. Die blaue Fläche markiert den Teil der Länder, in denen sich bis zum Jahr 2020 ein Einsatz von Photovoltaik ohne Subventionen lohnt. Für die Länder in der roten Fläche müssen die Kosten pro Watt peak¹⁰⁵ deutlich weiter sinken, bis die Photovoltaik ohne Subventionen gegenüber der konventionellen Energie konkurrenzfähig wird.

¹⁰⁵ Watt peak gibt die Leistung an, die ein Solarmodul unter Standard-Testbedingungen von 25°C und einer Einstrahlungsin-
tensität von 1.000 Watt pro Quadratmeter abgibt. Allerdings entspricht die Peakleistung nicht zwingend der Spitzenleistung
unter realen Einstrahlungsbedingungen.

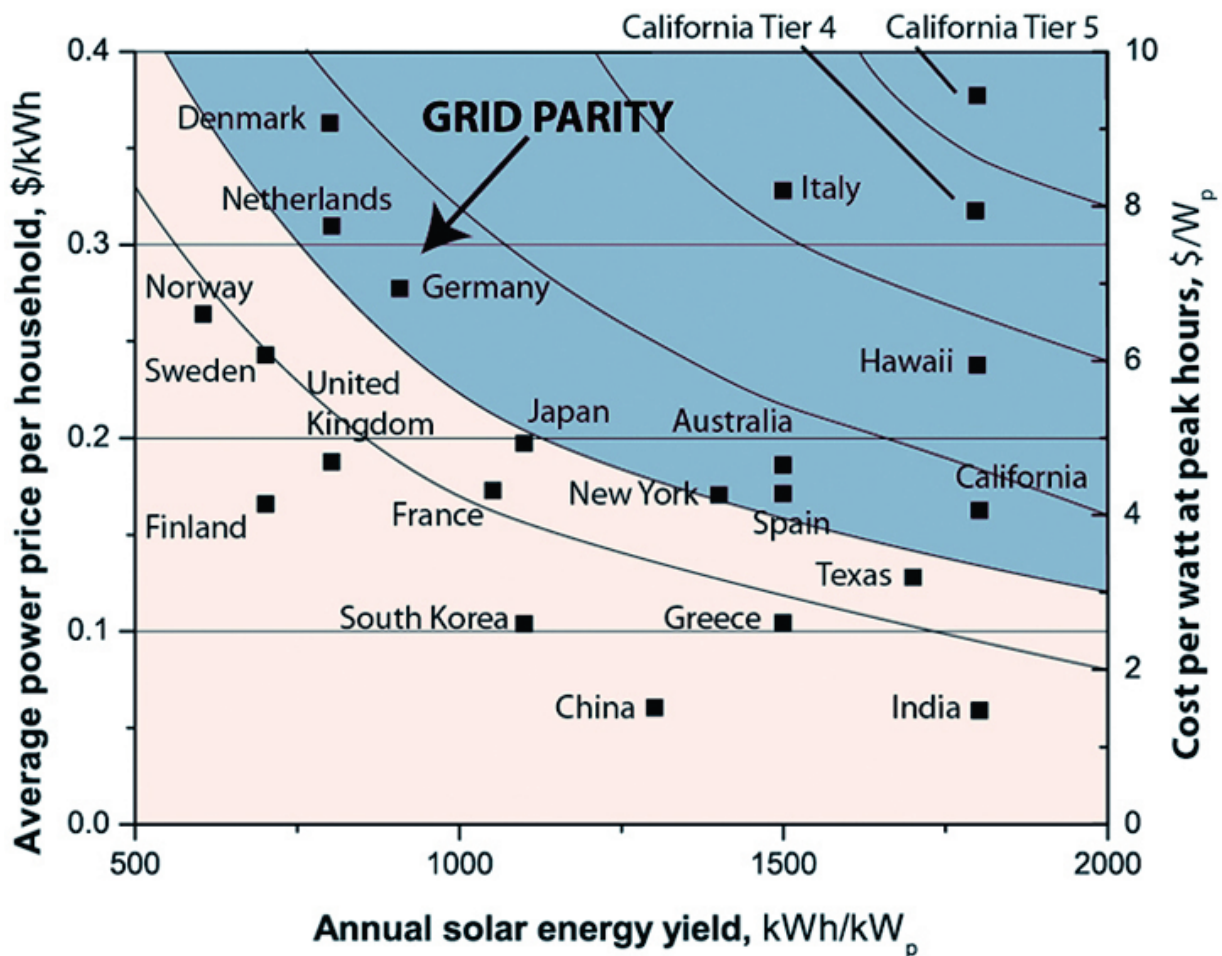


Abb. 2.10: Darstellung zeigt, in welchen Ländern sich der Einsatz von Photovoltaik lohnt, damit diese mit den Kosten der konventionellen Energieerzeugung konkurrieren kann
Quelle: McGeehee (2012)

Vielfach diskutiert werden Anwendungen wie die Energieversorgung mobiler Kleingeräte, mobiler Sensoren oder mobiler Mikrosysteme.¹⁰⁶

Allerdings scheinen durch die Eigenschaften von OPV noch einige neue Anwendungsgebiete möglich, die heute nur schwer abzuschätzen sind. Vor allem die Vorteile in der Designfreiheit machen Produkte möglich, die mit der Siliziumtechnologie nicht umsetzbar sind. So sind zum Beispiel Glasscheiben denkbar, die mit organischen Solarzellen beschichtet und dennoch semi-transparent sind. Tabelle 2.1 zeigt die Vor- und Nachteile der organischen Solarzellen gegenüber den siliziumbasierten Solarzellen.¹⁰⁷

¹⁰⁶ vgl. Hug (2007).

¹⁰⁷ vgl. Heliatek GmbH (o. J.); McGeehee (2012).

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile der OPV-Technologie in Bezug auf das Design, der Nachhaltigkeit und der Leistung gegenüber den siliziumbasierten Solarzellen

	Design	Nachhaltigkeit	Leistung
Vorteile	biegsam & bruchstest	kurze EPBT	Effizienz ist temperaturunabhängig
	dünn & leicht	organische Inhaltsstoffe sind verfügbar	gutes Verhalten bei schwachem Licht
	flexible Maße	keine Schwermetalle	geringere Abhängigkeit vom Bestrahlungswinkel
	semi-transparent	geringe Transportkosten durch geringes Gewicht	Bei gleicher Effizienz generieren OPV ca. 30% mehr Energie als Si-PV.
	verschiedene Farben möglich		
Nachteile	Geringe mechanische Stabilität		geringere Effizienz
	Geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen		geringere Haltbarkeit

2.1.2. Organische Leuchtdioden (OLED)

Eine OLED (organic light emitting diode) ist eine organische Leuchtdiode (LED) aus mehreren dünnen Schichten, bei der mindestens der lichtemittierende Halbleiter aus organischen halbleitenden Materialien besteht. Die Geschichte der elektrisch angeregten Lumineszenz geht bis in die 50er Jahre zurück, wobei dies bei einem organischen Halbleiter zum ersten Mal 1979 gelang. Die OLED-Technologie wird auf den folgenden Seiten vorgestellt und ist dabei in Funktionsweise und Aufbau, Materialien, Leistungskennzahlen, Herstellverfahren sowie Anwendungen gegliedert.

Funktionsweise und Aufbau

Der Schichtaufbau einer OLED ähnelt dem Schichtaufbau einer OPV, da die Wirkprinzipien verwandt sind. OLEDs sind aus mindestens drei Schichten aufgebaut: der Anode, dem Halbleiter (auch Emitterschicht) und der Kathode. Meist werden aber weitere Zwischenschichten verwendet. Bei einer Solarzelle werden durch die Energie der Sonnenstrahlen Atome des Halbleiters angeregt und die Ladungen eines Elektronen-Loch-Paares getrennt. Erreichen diese Ladungsträger die Anode und Kathode kann ein Strom fließen. Bei einer OLED wird elektrische Energie in das System eingebracht, indem die Elektronen von der Kathode und die Löcher von der Anode bereitgestellt werden. Diese La-

ungsträger bewegen sich durch die OLED und treffen sich idealerweise in der halbleitenden Emitterschicht, wo eine Rekombination der Ladungsträger stattfinden soll. Das Elektron und das Loch vereinen sich zunächst zu einem gebundenen Elektronen-Loch-Paar, dem sogenannten Exziton. Das Exziton zerfällt nach einiger Zeit unter Emission eines Photons. Die frei werdende Energie wird in elektromagnetische Strahlung umgewandelt; unter anderem auch in für Menschen sichtbares Licht.¹⁰⁸

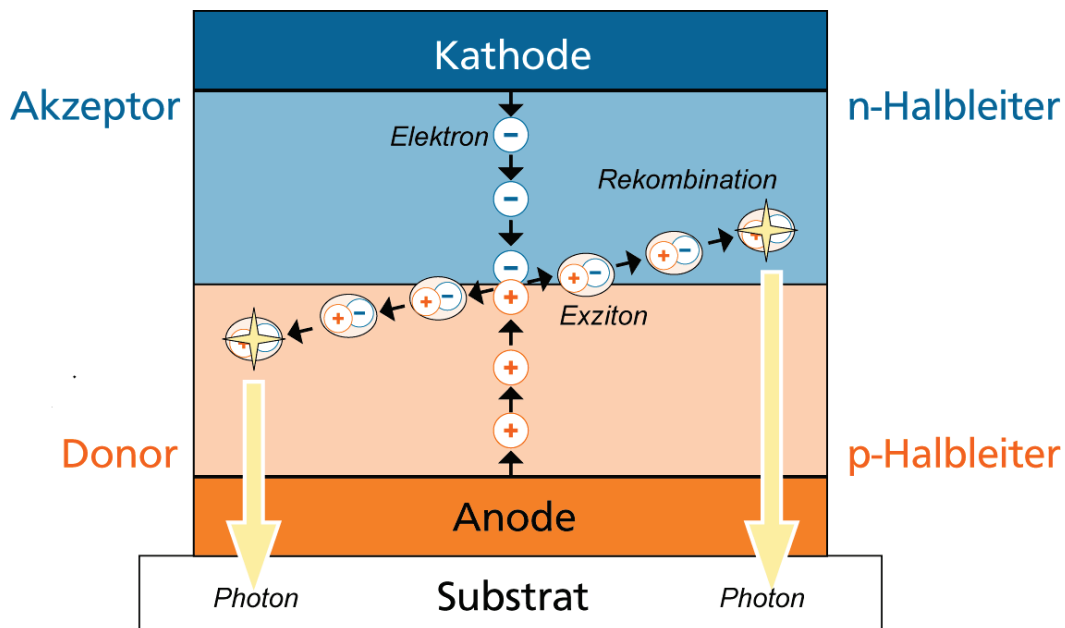


Abb. 2.11: Prinzipielle Funktionsweise einer OLED

Analog zu den unterschiedlichen Möglichkeiten die Schichten einer OPV anzuordnen, gibt es auch die Möglichkeit die Schichten einer OLED unterschiedlich anzuordnen. Abb. 2.12 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten.

Zum einen kann das Licht nach oben durch die Kathode emittiert werden (top emission). Deren Transparenz limitiert die ausgestrahlte Lichtmenge. Zum zweiten kann das Licht durch die Anode und das Substrat emittiert werden (bottom emission). Hierbei wird die Lichtmenge durch die Transparenz der Anode und dem Substrat begrenzt.¹⁰⁹

¹⁰⁸ vgl. Tsujimura (2012).

¹⁰⁹ vgl. Geffroy/le Roy/Prat (2006).

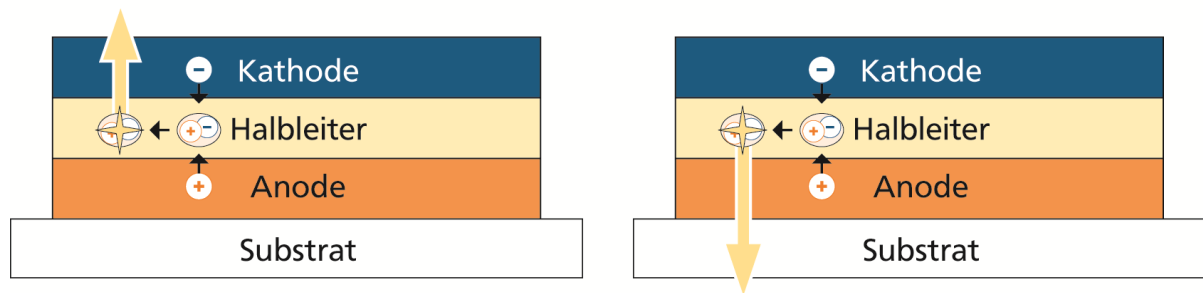


Abb. 2.12: Mögliche Geometrien von OLEDs. Link top emission und rechts bottom emission
Quelle: In Anlehnung an Geffroy/le Roy/Prat (2006)

Der Aufbau der OLED hat sich in den letzten Jahrzehnten stark geändert. Der grundsätzliche Aufbau von einer Emitterschicht, die zwischen Kathode und Anode sitzt, wurde beibehalten. Allerdings wurden immer mehr Hilfsschichten hinzugefügt. Inzwischen sind Varianten bekannt, die bis zu acht oder mehr Schichten verwenden.¹¹⁰ Abb. 2.13 zeigt, dass im Laufe der Entwicklungen immer mehr Hilfsschichten eingesetzt wurden. Dadurch konnte die Effizienz von OLEDs gesteigert werden.¹¹¹

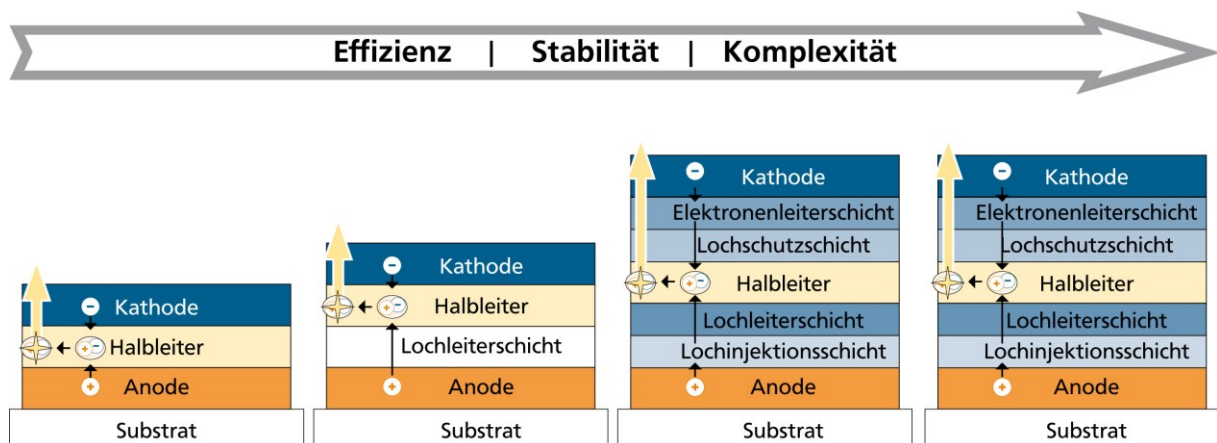


Abb. 2.13: Aufbau und Entwicklung organischer Photovoltaikzellen
Quelle: In Anlehnung an Geffroy/le Roy/Prat (2006)

Im folgenden Abschnitt wird ein typischer Aufbau einer OLED näher beschrieben: Die Anode besteht meistens aus ITO und wird auf einem Glassubstrat aufgebracht. Anstelle von Glas können auch Foliensubstrate eingesetzt werden. Darauf wird PEDOT:PSS¹¹² aufgebracht, das zur Absenkung der Injektionsbarriere für Löcher in die darüber liegenden Halbleiterschichten dient und die Ein-

¹¹⁰ vgl. Wu u. a. (2005).

¹¹¹ vgl. Geffroy/le Roy/Prat (2006).

¹¹² (Poly(3,4-ethylenedioxythiophen):Polystyrolsulfonat)

diffusion von Indium in den Übergang verhindert. Darauf wird eine Lochleitungsschicht (engl. hole transport layer, HTL) und eine Emitterschicht (engl. emitter layer, EL) aufgebracht. Optional wird eine Elektronenleitungsschicht (engl. electron transport layer, ETL) aufgebracht. Zum Abschluss wird eine Kathode, bestehend aus einem Metall oder einer Legierung, die eine geringe Elektronenaustrittsarbeit besitzen, aufgedampft.¹¹³ Dazu eignen sich beispielsweise Calcium, Aluminium, Barium, Ruthenium, Magnesium-Silber-Legierung. Als letzte Schicht wird eine Schutzschicht verwendet, um die empfindlichen Materialien vor Umwelteinflüssen wie Sauerstoff und Wasser zu schützen.¹¹⁴

Materialien

Für den Halbleiter werden zwei Materialsysteme für OLEDs unterschieden: Materialien auf Basis von Polymeren¹¹⁵ und Materialien auf Basis von Small Molecules.¹¹⁶ Darüber hinaus existieren Materialien für unterschiedliche Farben wie beispielsweise rot, grün und blau. Um weiße OLEDs zu erhalten, gibt es für Polymer-Systeme mehrere Möglichkeiten: zum einen können Mischungen aus drei Polymeren genutzt werden, die jeweils rot, grün und blau leuchten, oder Mischungen aus zwei Polymeren, die jeweils blau und orange leuchten. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, nur ein Polymer zu nutzen, welches direkt weißes Licht abstrahlt.¹¹⁷ Einen guten Überblick über verschiedene Materialien geben Mitschke und Bäuerle in Ihrem Review-Artikel.¹¹⁸ Die aktuell effizientesten Materialsysteme für OLEDs basieren auf Small-Molecules.¹¹⁹

Leistungskennzahlen

Zur Beurteilung von organischen Solarzellen werden unter anderen folgenden Kennzahlen genutzt:

Lifetime

Die Lebensdauer gibt die Zeit an, bis die Effizienz einer OLED einen definierten Wert unterschreitet. Üblich sind Angaben, bis die Effizienz auf 50% (T_{50}) oder 70% (T_{70}) des ursprünglichen Wertes gesunken ist.¹²⁰ Es existieren noch weite-

¹¹³ vgl. Geffroy/le Roy/Prat (2006).

¹¹⁴ vgl. Brabec/Dyakonov/Scherf (2008).

¹¹⁵ vgl. Raja u. a. (2008).

¹¹⁶ vgl. D'Andrade/Forrest (2004).

¹¹⁷ vgl. Raja u. a. (2008).

¹¹⁸ vgl. Mitschke/Bäuerle (2000).

¹¹⁹ vgl. Kamtekar/Monkman/Bryce (2010).; vgl. Wu u. a. (2010).

¹²⁰ vgl. Kamtekar/Monkman/Bryce (2010).

re Kennzahlen, die eine OLED beschreiben: EQE, Power efficiency, CIE coordinates¹²¹, CRI (color rendering index)¹²² größer 80¹²³, correlated color temperature¹²⁴ zwischen 2500K und 6500K¹²⁵ und device lifetime.¹²⁶

Turn-on Voltage

Für die Einschaltspannung existieren mehrere Definitionen: In einigen Studien wird sie als Schwellwertspannung definiert, bei der die Stromdichte beispielsweise 1 mA/cm^2 erreicht, oder bei der Stromdichte sehr stark anzusteigen beginnt. Andere beschreiben die Einschaltspannung als die Spannung, bei der die OLED einen gewissen Helligkeitswert erreicht, beispielsweise 1 cd/m^2 oder 10 cd/m^2 .¹²⁷

Efficiency

Die Effizienz bei OLEDs wird meist in Lumen pro Watt (lm/W) angegeben und hängt von der Helligkeit Candela pro Quadratmeter (cd/m^2) ab. Bei der Effizienz von OLEDs gibt es mehrere Interpretationen: die Pixel-Effizienz, die Panel-Effizienz sowie die Leuchten-Effizienz.¹²⁸

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{\text{abgegebene Helligkeit}}{\text{Energie – Input}} \quad \text{Formel 2.7}$$

Anwendungen

Die OLED-Technologie bietet völlig neue Möglichkeiten für eine Vielzahl an neuen Produkten und ebenfalls für Substitutionsprodukte für herkömmliche Beleuchtung. Wie in Tabelle 2.2 beschrieben, besitzen OLEDs signifikante Vorteile gegenüber anderen Beleuchtungstechnologien, jedoch gibt es auch Felder in denen die OLEDs noch nicht die Leistungswerte von Konkurrenztechnologien erreichen. Dies trifft vor allem auf die Effizienz und die Haltbarkeit von OLEDs zu. Langfristig muss die OLED-Technologie eine Effizienz von 50 lm/W, eine Lebensdauer T80 von 100.000 Stunden, eine Modulgröße von 10 bis 60 cm^2

¹²¹ Commission Internationale de L'éclairage (CIE), Colorimetry, Publication Report No. 15.2, 1986.

¹²² Commission Internationale de L'éclairage (CIE), Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, Publication Report No. 13.2, 1974.

¹²³ vgl. D'Andrade/Forrest (2004).

¹²⁴ vgl. Illuminating Engineering Society of North America (2000).

¹²⁵ vgl. D'Andrade/Forrest (2004).

¹²⁶ vgl. Kamtekar/Monkman/Bryce (2010).

¹²⁷ vgl. Wu u. a. (2010).

¹²⁸ vgl. Chan/Tao/Yam (2010); Ameri u. a. (2009).

sowie eine Leuchtdichte von 300 cd/m² bei einfachen Anwendungen und 3.000cd/m² bei anspruchsvollen Anwendungen. Diese Werte können laut OE-A-Studie bis zum Jahr 2020 erreicht werden.¹²⁹

Tabelle 2.2: Merkmale und Vorteile von OLED-Produkten¹³⁰

Merkmale	Erläuterung
Flexible Produkte	Die Möglichkeit flexible Substrate einzusetzen und die geringe Schichtdicke, ermöglichen neuartige flexible Produkte.
Transparente Produkte	Durch die Möglichkeit die funktionalen Schichten wie Halbleiter und Elektroden, sehr dünn aufzubringen, sind die Schichten transparent. Werden diese auf transparente Substrate wie Glas oder Folie aufgebracht, können transparente Anzeigen hergestellt werden.
Energieverbrauch	OLED-Produkte ermöglichen durch ihr Wirkprinzip eine hohe Effizienz.
Umweltfreundlichkeit	OLEDs bestehen aus organischen Halbleitern und enthalten weder Blei noch Quecksilber, was die Entsorgung vereinfacht und möglicherweise als Marketinginstrument für grüne Technologien eingesetzt werden kann.
Dünn, leicht, robust	Durch die kompakte Baugröße, das sehr geringe Gewicht und die extreme Unempfindlichkeit gegenüber Stößen und Schlägen lassen sich neue Anwendungsbereiche erschließen.
Temperatur-eigenschaften	OLEDs sind bei niedrigen Temperaturen unempfindlicher als LCDs und zeigen auch bei niedrigen Temperaturen noch gute Reaktionszeiten.
Kontrastdarstellung	Da OLED-Displays, durch ihr Wirkprinzip bedingt, bei der Darstellung schwarzer Farben an den schwarzen Stellen keinerlei Licht aussenden, ist ihre Kontrastdarstellung besser als bei anderen Technologien.
Reaktionszeit	Durch ihre sehr schnellen Reaktionszeiten sind OLED-Displays außerordentlich gut für 3D-Darstellungen geeignet und liefern bessere Werte als beispielsweise LCDs.

Bisher kristallisieren sich vor allem zwei Anwendungsgebiete für die OLED-Technologien heraus: Displays und Beleuchtung. OLED-Displays bieten Vorteile gegenüber Standard-LCD-Panels wie beispielsweise dünnere Displays, günstige-

¹²⁹ vgl. Clemens u. a. (2011).

¹³⁰ vgl. Meyer u. a. (2008).; vgl. Behrendt u. a. (2008).; vgl. Lee/Liu/Wu (2008); vgl. Colegrove (2009).

re Produktionskosten und bessere Effizienz.¹³¹ Erste OLED-Displays sind bereits seit 1999 auf dem Markt und etablieren sich außerdem in dem Bereich von Smart-Phones. Da die Nutzungsdauer von Smart-Phones im Allgemeinen deutlich geringer ist, als die von Fernsehern, sind Smart-Phones besonders interessant für die OLED-Technologie. In dem Bereich OLED-Beleuchtung gibt es bereits einige Prototypen, die aber gegenüber etablierten Technologien noch sehr teuer sind. Sobald die Kosten der OLEDs drastisch sinken, könnten OLEDs auch für die Beschilderung interessant werden.¹³²

Herstellverfahren

Ähnlich den Herstellverfahren von OPV gibt es mehrere Möglichkeiten die Materialien für OLEDs zu prozessieren. Organische Small-Molecules sowie metallische Schichten lassen sich aufdampfen.¹³³ Die organischen Materialien lassen sich auch in einen flüssigen Zustand bringen, um damit diese Schichten durch Spincoating¹³⁴, Coaten¹³⁵ sowie Druckverfahren¹³⁶ zu erzeugen. So zeigte General Electric bereits im Jahr 2008 gedruckte OLEDs.¹³⁷ In der Vergangenheit wurden vor allem die Polymer-Materialien mit Lösemitteln in einen flüssigen Zustand gebracht, damit diese mit Druckverfahren verarbeitet werden können. Mit Materialien aus kleinen Molekülen war dies lange Zeit nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich. Da die Materialien aus kleinen Molekülen bessere Leistung versprechen wurde intensiv daran geforscht diese auch in Flüssigkeit zu bringen, damit sie gedruckt werden können.¹³⁸

Bei nasschemisch hergestellten mehrschichtigen Devices, die aus Lösung hergestellt werden, gibt es ein Problem, dass die Lösemittel jeder weiteren aufgetragenen Schicht das Material aus den bereits bestehenden Schichten wieder auflösen können. Eine Möglichkeit dies zu umgehen, besteht darin orthogonale Lösemittel zu verwenden, damit die Lösemittel die darunter liegende Schicht nicht beschädigt.¹³⁹ Die zweite Möglichkeit ist, die abgeschiedene Schicht che-

¹³¹ vgl. Nuyken u. a. (2002).

¹³² vgl. Harkema (2010); Erritt u. a. (2010).

¹³³ vgl. Erritt u. a. (2010).

¹³⁴ vgl. Markham u. a. (2002).

¹³⁵ vgl. Harkema (2010).

¹³⁶ vgl. Harkema (2010).

¹³⁷ vgl. Duggal (2008).

¹³⁸ vgl. Rehmann (2009).; vgl. Bornemann/Sauer/Dörsam (2011).

¹³⁹ vgl. Sax u. a. (2010).

misch zu vernetzen, so dass diese nicht mehr von Lösemittel angegriffen werden kann (Crosslinking-Strategie).¹⁴⁰

2.1.3. Organischer Feldeffekttransistor (OFET)

Ein OFET¹⁴¹ ist ein Feldeffekttransistor, bei dem mindestens der Halbleiter aus organischen Materialien besteht. Bereits 1928 wurde der Feldeffekt, welchem der Transistor seinen Namen verdankt, entdeckt und seine Anwendung 1935 patentiert.¹⁴² Die OFET-Technologie wird auf den folgenden Seiten vorgestellt und dabei in Funktionsweise und Aufbau, Materialien, Leistungskennzahlen, Herstellverfahren sowie Anwendungen gegliedert.

Funktionsweise und Aufbau

Es gibt mehrere Arten von Feldeffekttransistoren,¹⁴³ wobei in der druckbaren Elektronik vor allem der Thin-Film Transistor zum Einsatz kommt. Dieser besteht aus drei Hauptkomponenten: die Halbleiterschicht, die Isolationsschicht und drei Elektroden. Die Source- und Drain-Elektroden sind mit dem Halbleiter in Kontakt, während die Gate-Elektrode durch die Isolationsschicht davon getrennt ist.¹⁴⁴ In Abb. 2.14 sind die vier Möglichkeiten dargestellt, einen solchen Transistor aufzubauen.

Ein Transistor ist ein veränderlicher Widerstand, dessen Funktionsweise auf dem Feldeffekt beruht. Zwischen der Gate- und der Source- bzw. Drain-Elektrode wird wie in einem Plattenkondensator ein Feld aufgebaut. Die Dichte der Ladungsträger hängt dabei von der Spannung ab, die an die zweite Platte, der Gate-Elektrode, angelegt wird.¹⁴⁵ Durch das elektrische Feld steigt die Dichte der Ladungsträger im Halbleiter. Dadurch sinkt der Widerstand des Halbleiters und bei angelegter Spannung kann ein größerer Strom von der Source- zu der Drain-Elektrode fließen. Wird das elektrische Feld zwischen Gate- und Source-Elektrode abgeschaltet, steigt der Widerstand des Halbleiters stark an und der Stromfluss verringert sich somit. Dieser Strom im „ausgeschalteten“ Zustand wird Leckstrom genannt. Je nach Art des Halbleiters (n- oder p-Typ),

¹⁴⁰ vgl. Kamtekar/Monkman/Bryce (2010).; vgl. Meerholz/Müller/Nuyken (2006).

¹⁴¹ OFET, engl. für „organic field effect transistor“

¹⁴² vgl. Jansen (1980).

¹⁴³ MIS-FET, MES-FET und Thin-Film Transistor

¹⁴⁴ vgl. Horowitz (2004).

¹⁴⁵ vgl. Horowitz (1998).

wandern entweder Elektronen oder Löcher durch den Halbleiter. Organische Feldeffekttransistoren (OFET) werden auf einem Substrat wie Glas oder Folie aufgebracht. Für den Aufbau der verschiedenen Schichten gibt es verschiedene Möglichkeiten: Bottom Gate mit Bottom Contact oder Top Contact sowie Top-Gate mit Bottom Contact oder Top Contact.¹⁴⁶ Abb. 2.14 zeigt die unterschiedlichen Aufbaumöglichkeiten eines OFETs in der Schnittdarstellung, um die unterschiedlichen Schichten darzustellen.

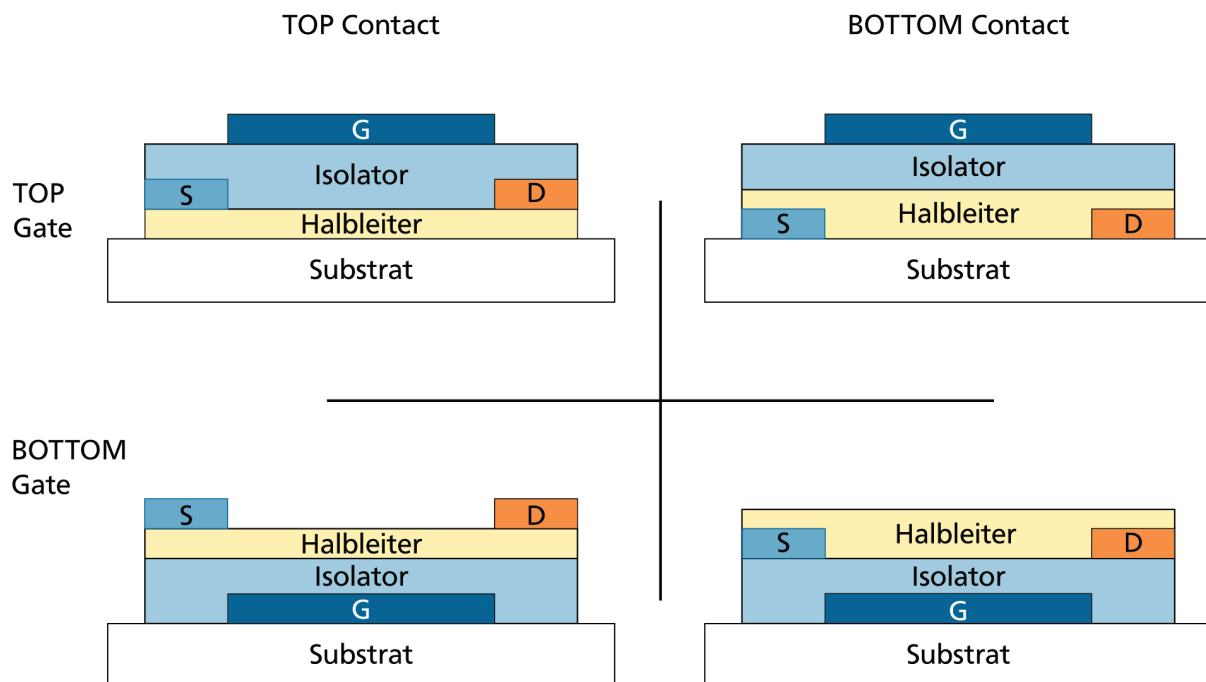


Abb. 2.14: Mögliche Geometrien von organischen Feldeffekttransistoren
Quelle: In Anlehnung an James u. a. (2012) sowie Siol (2012)

Als Beispiel wird hier die Variante Top Gate mit Bottom Contact vorgestellt. Hierzu werden zwei Elektroden, die Source- und Drain-Elektroden, auf das Substrat aufgebracht. Zwischen die beiden Elektroden wird der Halbleiter gedruckt. Da dieser nicht exakt in diese Lücke gedruckt werden kann, liegt der Halbleiter meist auch auf den Source- und Drain-Elektroden. Um den Halbleiter von der Gate-Elektrode zu isolieren, kommt ein Dielektrikum zwischen Halbleiter und Gate-Elektrode. Die Gate-Elektrode wird auf die Dielektrikumsschicht zwischen die Source- und Drain-Elektroden aufgebracht. Die Schichten sind meist nur wenige hundert Nanometer dick. Die Leistung eines Transistors hängt nicht nur allein von den Materialkennwerten ab, sondern auch unter anderem

¹⁴⁶ vgl. IanJames u. a. (2012); Siol (2012).

von den Schichtdicken,¹⁴⁷ der Homogenität der Schichten,¹⁴⁸ der Kanallänge L und Kanalweite W . Die Kanallänge hat einen sehr großen Einfluss auf die Leistung eines OFETs. Je kleiner die Kanallänge, desto geringer kann die anzulegende Spannung sein, um einen bestimmten Strom fließen zu lassen und umso schneller lässt sich der Transistor „schalten“. ¹⁴⁹ Aus diesem Grund ist es erstrebenswert, den Abstand zwischen Source- und Drain-Elektrode zu verkleinern. Bei OFETs lässt sich die Kanalweite erhöhen, indem die Source- und Drain-Elektrode als interdigitale Kammstruktur aufgebaut werden. Abb. 2.15 zeigt die Source-Drain-Struktur eines OFETs als interdigitale Kammstruktur in der Draufsicht. Die Kanalweite ist die Strecke, an der sich die beiden Elektroden gegenüber liegen und somit ein elektrisches Feld angelegt werden kann. In der in Abb. 2.15 dargestellten interdigitalen Kammstruktur gibt es sieben gegenüberliegende Elektrodenarme. Somit beträgt die Kanalweite siebenmal der hier eingezeichneten Länge $W/7$. Die Kanallänge L ist der Abstand zwischen der Source- und Drain-Elektrode.

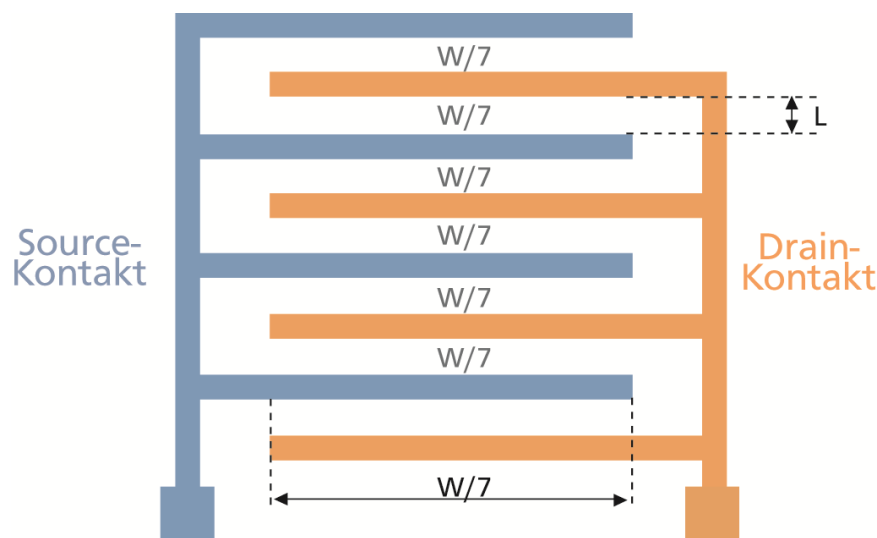


Abb. 2.15: Source-Drain-Struktur eines OFETs als interdigitale Struktur mit der Kanallänge L und der Kanalweite W .

Materialien

Wie auch bei OPV und OLED, sind die Halbleiter für organische Transistoren aus Polymeren oder kleinen Molekülen herstellbar. ¹⁵⁰ Die Polymere sind langkettige Moleküle aus Kohlenstoffketten, die aus 10^3 bis 10^5 Monomeren beste-

¹⁴⁷ vgl. Spiehl u. a. (2012).

¹⁴⁸ vgl. Sauer u. a. (2012).

¹⁴⁹ vgl. Horowitz (2004).

¹⁵⁰ vgl. Horowitz (2004).

hen. Sie besitzen im Gegensatz zu den kleinen Molekülen ein hohes Molekulargewicht.¹⁵¹ Die kleinen Moleküle lassen sich mit Aufdampfanlagen verarbeiten, während dies mit Polymeren nicht möglich ist. Polymere werden aus der flüssigen Phase prozessiert. Kleine Moleküle lassen sich allerdings auch aus der flüssigen Phase verarbeiten.¹⁵² Die Leistung der Polymerschichten hängt unter anderem von der Struktur der Polymere in der Schicht ab.¹⁵³

Leistungskennzahlen

Zur Beurteilung von organischen Solarzellen werden unter anderen folgenden Kennzahlen genutzt:

Schwellspannung (Threshold-Spannung) V_t

Die Schwellspannung V_t ist die Spannung, bei welcher der Transistor beginnt Strom zu leiten. Erstrebenswert sind betragsmäßig kleine Schwellspannungen, da somit auch die Betriebsspannung reduziert werden kann (vgl. Formel 2.8).¹⁵⁴

Leckstrom

Leckstrom ist der Strom, welcher noch fließt, wenn das elektrische Feld zwischen Gate- und Source-Elektrode abgeschaltet ist. Der Widerstand des Halbleiters steigt stark an und der Stromfluss verringert sich somit, aber der Stromfluss kann nicht komplett verhindert werden.

Leckströme sollten so klein wie möglich sein, da diese den Energieverbrauch einer Schaltung erhöhen.¹⁵⁵

Drain-Source-Spannung

In Formel 2.8 steht W steht für Kanalbreite und L für die Kanallänge. In dieser Formel werden drei Spannungen unterschieden: V_{gs} ist die Gate-Source Spannung, V_{ds} ist die Drain-Source-Spannung und V_{th} ist die Schwellspannung. μ ist die Ladungsträgermobilität und C_i ist die Gate Kapazität.

$$I_{ds} = \frac{W}{L} \mu C_i (V_{gs} - V_{th} - \frac{V_{ds}}{2}) V_{ds} \quad \text{Formel 2.8}$$

¹⁵¹ vgl. Ivers-Tiffée/Münch (2007).

¹⁵² vgl. Sirringhaus (2007).

¹⁵³ vgl. Horowitz (2004).

¹⁵⁴ Pankalla (2012).

¹⁵⁵ Pankalla (2012).

On/Off ratio

Verhältnis des maximalen Drain-Source-Stroms zum minimalen Drain-Source-Strom. Ein Treibertransistor muss ein großes On/Off Verhältnis haben, um nachgeschaltete Transistoren definiert treiben zu können.¹⁵⁶

$$On/Off = \frac{I_{DS}(V_{GS\ max})}{I_{DS}(V_{GS\ min})} \quad \text{Formel 2.9}$$

Betriebsspannung V_{DD}

Die Betriebsspannung V_{DD} ist die Spannung, bei welcher ein bestimmter Strom fließt und der Transistor in Sättigung ist. Je kleiner die Schwellspannung V_t , desto geringer die benötigte Betriebsspannung.¹⁵⁷

Ladungsträger-Mobilität (mobility)

Die Mobilität μ , auch als Ladungsträgerbeweglichkeit bezeichnet, ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der Ladungsträger sich im Halbleiter bewegen. Sie ist als Proportionalitätskonstante zwischen Driftgeschwindigkeit v_d der Ladungsträger und elektrischer Feldstärke E definiert. Ein Elektron wird in einem elektrischen Feld beschleunigt und kann nach einer typischen Zeit t an einem Atom gestreut und dabei abgebremst werden.¹⁵⁸ Die Beweglichkeit ist nun umso größer, desto länger die Zeit t ist. Es gilt für Teilchen der effektiven Masse m und der Ladung e :

$$v_d = \mu E \quad \text{Formel 2.10}$$

Die Ladungsträgermobilität entspricht der Driftgeschwindigkeit der Ladungen im Atomgitter.¹⁵⁹

$$\mu = \frac{v_d}{E} \quad \text{Formel 2.11}$$

Die Ladungsträgermobilität sagt folglich etwas über die Leitfähigkeit σ der eingesetzten Materialien aus. Die Leitfähigkeit hängt folglich von der elektrischen

¹⁵⁶ Pankalla (2012).

¹⁵⁷ Pankalla (2012).

¹⁵⁸ Für eine detaillierte Darstellung der Mobilität für organische Halbleiter vgl. Noriega/Salleo/Klauk (2012).

¹⁵⁹ vgl. Jurchescu u. a. (2012).

Ladung q , der Konzentration freier Elektronen¹⁶⁰ n und der Ladungsträgermobilität μ ab.

$$\sigma = q * n * \mu \quad \text{Formel 2.12}$$

Mobilitäten von aktuellen druckbaren Halbleitern liegen bei ca. $0,1 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$. So konnten im Polytos-Projekt für p-Halbleiter Mobilitäten von etwa $0,1\text{-}0,2 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ erreicht werden.¹⁶¹

Herstellverfahren

Die verschiedenen Materialklassen, vor allem in Bezug auf den Halbleiter, entsprechen denen von OPV und OLED. Deshalb lassen sich auch ähnliche Herstellverfahren verwenden. So ist es möglich diese Materialien aufzudampfen oder aus der flüssigen Phase zu drucken. Heute werden Spin-Coating, Inkjet, Tiefdruck, Coating und andere Druckverfahren eingesetzt.

Aus der Geometrie der OFETs gibt es aus der Sicht der Herstellverfahren einen entscheidenden Unterschied. Da die Kanallänge, der Abstand der Source- und Drain-Elektrode so gering wie möglich sein soll, liegt hier die Herausforderung darin, diese kleinen Strukturen mit sehr geringem Abstand herzustellen. In der Siliziumindustrie werden hier Abstände bis auf wenige zehn Nanometer erreicht. Für die organischen Transistoren sind aktuell Kanallängen von mehreren zehn bis über $100 \mu\text{m}$ erreichbar. Somit liegen die Kanallängen der OFETs ca. drei Größenordnungen über den der Silizium-Transistoren. Über spezielle Strukturierungsverfahren, wie zum Beispiel den Wetting/De-Wetting-Verfahren, wurden in Kombination mit Massendruckverfahren wie dem Tief- und Flexodruckverfahren bereits Kanallängen von ca. $10 \mu\text{m}$ erreicht.¹⁶² Bei der Herstellung von OFETs spielt das Register eine entscheidende Rolle, da mehrere Schichten sehr exakt übereinander gedruckt werden müssen. Je größer die Abweichungen der Schichten, beispielsweise des Gates gegenüber den Source- und Drain-Kontakten, desto größer muss der Puffer sein, so dass die Abstände von Source und Drain größer gewählt werden müssen.

¹⁶⁰ Die Konzentration freier Elektronen wird auch Ladungsträgerdichte genannt.

¹⁶¹ vgl. o A (2012d).

¹⁶² vgl. Schmidt u. a. (2010).

Anwendungen

Mit Schaltungen aus organischen Transistoren sind viele Anwendungen denkbar. Für eine Funktion, die mit einer Schaltung umgesetzt wird, werden mehrere Transistoren benötigt. Als Beispiel sei hier die Schaltung aus dem BMBF-Projekt Polytos genannt. Dieses Smart Label wertet aus, ob eine Temperaturschwelle überschritten wurde. Auf diesem Smart Label ist neben der Schaltung ein Temperatursensor und ein RFID-Chip mit Antenne integriert. Für dieses einfache Smart Label sind ca. 200 Transistoren notwendig.¹⁶³ Des Weiteren sind RFID-Chips denkbar, die komplexere Daten übertragen. Auch die Ansteuerung von Displays, vor allem OLED-Displays ist mit leistungsstarken OFETs denkbar.

2.1.4. Applikationen der druckbaren Elektronik

Im folgenden Abschnitt wird eine Auswahl weiterer Applikationen der druckbaren Elektronik beschrieben, die neben den drei wichtigsten Devices OPV, OLED und OFET auch zur druckbaren Elektronik gezählt werden.

Anorganische Elektrolumineszenz

Das Prinzip der Elektrolumineszenz (EL) ist bereits sehr lange bekannt und wurde 1936 von Georges Destriau entdeckt¹⁶⁴. EL-Folien gehören zu den ersten Produkten der druckbaren Elektronik. EL-Leuchtfolien leuchten auf einer Fläche, sind aber im Vergleich zu der OLED-Technologie nicht sehr energieeffizient. Die Grundmaterialien sind anorganische Pasten, die sich meist im Siebdruck verdrucken lassen.¹⁶⁵ Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass sich diese Pasten auch im Flexodruck verarbeiten lassen.¹⁶⁶

Trotz zahlreicher Anwendungsmöglichkeiten wie Tachobeleuchtung, Schilderbeleuchtung und Möbelbeleuchtung, konnte sich diese Technologie bisher nicht flächendeckend auf dem Markt durchsetzen. EL-Folien weisen einige Unzulänglichkeiten auf: zum Betrieb wird eine relativ hohe Wechselspannung benötigt.¹⁶⁷ Dies macht einen elektronischen Inverter notwendig, welcher zum einen Energie benötigt und zum anderen die Transportfähigkeit stark einschränkt. Zum anderen erfordert die hohe Spannung Schutzmaßnahmen für den Benutzer. Die meisten Produkte wurden durch LED-Beleuchtung substituiert.

¹⁶³ vgl. Pankalla/Ganesan/u. a. (2011).; vgl. Jakimovski u. a. (2012).;

¹⁶⁴ vgl. Destriau (1936).

¹⁶⁵ vgl. Sauer/Ranfald/Dörsam (2010).

¹⁶⁶ vgl. Ranfald/Theopold/Dörsam (2011).

¹⁶⁷ vgl. Sauer/Ranfald/Dörsam (2010).

Leitende Strukturen

Im Jahre 1943 meldete Paul Eisler in London das Patent 639,178 „Manufacture of Electric Circuits and Circuit Components“ an, welches das Drucken von Schaltungen beschreibt. Es dauerte einige Jahre, bis diese Technik schließlich in den USA als Teil eines Rüstungsprojekts zum Einsatz kam.¹⁶⁸ Daraus entwickelte sich das PCB - printed circuit board, die Leiterplatte. Dabei werden auf einem isolierenden Substrat leitende Strukturen aufgedruckt und andere Bauelemente aufgebracht. Für das Verarbeiten von leitfähigen Materialien wurde von Beginn an das Siebdruckverfahren eingesetzt, da mit diesem Verfahren die notwendigen Schichtdicken erzeugt werden können. In der Dickschicht-Hybridtechnik wurden leitende Materialien auf Keramik- und Foliensubstraten im Siebdruck gedruckt. Da diese Leiterbahnen mit Isoliermaterial bedeckt wurden, konnten mehrere Leiter übereinander aufgebracht werden. Neben Leitern wurden auch Widerstände und selten auch Kondensatoren gedruckt. Heute werden auch andere Pasten aus Kupfer, Silber oder Gold verarbeitet.

Ein weiteres Einsatzgebiet entwickelte sich durch die Photovoltaik. In den konventionellen Solarzellen werden die Leiterbahnen mit Silberpasten im Siebdruck gedruckt.¹⁶⁹ Um die notwendigen Schichtdicken zu erhalten, werden teilweise die Leiterbahnen durch mehrfaches übereinander Drucken erzeugt. Auch Antennen werden bereits hergestellt. So stellen beispielsweise die Unternehmen Hirschmann GmbH und Schreiner Group GmbH & Co. KG solche Antennen her. Im Siebdruck werden hierfür Silberpasten auf Folien gedruckt. Das Drucken von Antennen für RFID-Anwendungen ist eine neue Anwendung dieser Technologie.¹⁷⁰

Sensoren

Druckverfahren werden für die Herstellung von Sensoren bereits eingesetzt. So zeigen Shi u.a. (2011) die Herstellung eines gedruckten Temperatursensors, der kontaktlos ausgelesen werden kann. Sie stellten dabei ein Array von 4 auf 7 Sensoren auf PET-Folie im Siebdruckverfahren her.¹⁷¹ Wang u.a. (2012) zeigen einen im Siebdruck hergestellten Feuchtigkeitssensor, welcher beispielsweise bei Wasserschäden in Gebäuden oder in Verpackungen eingesetzt werden

¹⁶⁸ vgl. Kluger (2006).

¹⁶⁹ vgl. Frey u. a. (2011a).

¹⁷⁰ vgl. Shin/Lee/Kim (2009).

¹⁷¹ vgl. Shi u. a. (2011).

kann.¹⁷² Auch Unander und Nilsson (2009) untersuchen die Eignung von gedruckten Feuchtigkeitssensoren zur Verwendung in Verpackungen.¹⁷³ Hart/Matthews/Collier (1999) sowie Sprules u.a. (1996) stellen im Siebdruckverfahren Laktatsensoren her¹⁷⁴, während Kulys und D’Costa (1991) im Siebdruck einen elektrochemischen Sensor zur Bestimmung von Ascorbinsäure herstellen.¹⁷⁵ Dabei verändern Druckverfahren die Herstellung von Sensoren mit biologischen Molekülen. Durch diese Verfahren kann eine Massenfertigung von Biosensoren und anderer Bio-Devices realisiert werden, da die Durchsätze deutlich gesteigert und somit die Herstellungskosten deutlich gesenkt werden können.¹⁷⁶

Batterien

Gedruckte Batterien sind für den Erfolg der druckbaren Elektronik sehr wichtig, da alle anderen Devices, sofern sie ihre Vorteile wie geringes Gewicht und Flexibilität ausspielen sollen, mobil eingesetzt werden und somit mit Energie versorgt werden müssen. Somit besteht ein Bedarf für hochenergetische Mikrobatterien. Gedruckte Batterien sind besonders interessant, da diese zum einen sehr günstig hergestellt werden können und zum anderen einfach in andere (flexible) Devices integriert werden können.

Es existieren viele verschiedene Ansätze Batterien zu drucken. Peng u.a. (2012) drucken Batterien, deren Elektroden aus Kupfer- und Zink-Nanopartikeln bestehen. Diese Materialien haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zu lithiumbasierten Batterien günstig sind. Allerdings sind die Leistungsdaten auch schlechter.¹⁷⁷ Darüber hinaus existieren Ansätze, aufladbare zinkbasierte Batterien herzustellen,¹⁷⁸ alkalibasierte Batterien zu drucken,¹⁷⁹ oder Batterien auf Silber-Zink-Basis herzustellen.¹⁸⁰

¹⁷² vgl. Wang/Larsson/u. a. (2012).

¹⁷³ vgl. Unander/Nilsson (2009).

¹⁷⁴ vgl. Hart/Matthews/Collier (1999).; vgl. Sprules u. a. (1996).

¹⁷⁵ vgl. Kulys/D’Costa (1991).

¹⁷⁶ vgl. Gonzalez-Macia u. a. (2010).

¹⁷⁷ vgl. Peng u. a. (2012).

¹⁷⁸ vgl. Wang/Kim/u. a. (2012).

¹⁷⁹ vgl. Gaikwad u. a. (2011).

¹⁸⁰ vgl. Braam/Volkman/Subramanian (2012).

Smart Labels

Smart Labels, teilweise auch smart tags genannt, sind meist kleine und flache Devices, die mehrere Funktionen auf einem Substrat vereinen. Smart Labels können dabei als Etiketten oder Chipkarte designet werden, oder direkt in Kleidung, Verpackungen und andere Bauteile integriert werden. Eine häufig diskutierte Funktion von Smart Labels ist vor allem das item-level tagging in Logistik-Anwendungen in Kombination mit RFID-Auslesemöglichkeit¹⁸¹, oder Smart Labels als Basis für das Internet der Dinge, in denen alle Gegenstände vernetzt werden können.¹⁸²

Da diese auch in der Siliziumelektronik hergestellt werden, liegt hier mehr der Fokus auf druckbare Smart Labels. Häufig wird ein Sensor aufgebracht, der durch eine elektronische Schaltung ausgewertet wird. Die Werte werden unter Umständen gespeichert und ausgelesen oder aktiv gesendet.

Forschungsergebnisse zeigen, dass solche Smart Labels druckbar sind.¹⁸³ So werden beispielsweise druckbare Smart Labels zum Auslesen der Temperatur¹⁸⁴, oder die Integration von Feuchtigkeitssensoren in Verpackungen erforscht.¹⁸⁵ Auch das Recycling der gedruckten Smart Labels ist Gegenstand der Forschung, da die Recyclebarkeit ein entscheidender Faktor für den Erfolg solcher Smart Labels ist.¹⁸⁶

¹⁸¹ vgl. Strassner/Fleisch (2005). vgl. Abad u. a. (2009).

¹⁸² vgl. Fleisch/Mattern (2005); Mattern (2001).

¹⁸³ vgl. Jakimovski u. a. (2012).

¹⁸⁴ vgl. Pankalla/Ganesan/u. a. (2011).

¹⁸⁵ vgl. Mantysalo u. a. (2012).

¹⁸⁶ vgl. Villforth (2010).

2.2. Überblick der technischen Grundzüge

In diesem Abschnitt werden die technischen Grundlagen für diese Arbeit erarbeitet. In Kapitel 2.2.1 werden die Fertigungsverfahren für die druckbare Elektronik beschrieben. Hierfür wird eine Systematisierung für die Fertigungsverfahren der druckbaren Elektronik erarbeitet. Es werden die heute bekannten Fertigungsverfahren aufgelistet und Unterscheidungsmerkmale erarbeitet. Daraufhin werden einige ausgewählte Fertigungsverfahren der vakuumlosen und der vakuumbasierten Verfahren vorgestellt. In Kapitel 2.2.1.2 werden die funktionalen Schichten, die Grundlage aller Devices der druckbaren Elektronik sind, beschrieben und die relevanten Charakteristiken erarbeitet.

Seit einigen Jahrzehnten wird bereits an der druckbaren Elektronik geforscht, aber bis heute konnten sich noch keine bedeutenden Produkte durchsetzen. Solche sogenannten „Killerapplikationen“ könnten beispielsweise der großflächige Einsatz von OPV, von OLED-Lighting sowie von gedruckten RFID-Etiketten sein. Aber gerade diese Produktideen waren eine wichtige Grundlage für die Marktprognosen verschiedener Anbieter.¹⁸⁷ Folglich konnten die Prognosen bisher so nicht erfüllt werden. Einige wenige Produkte sind bereits auf dem Markt zu finden. Dazu zählen Elektrolumineszenzprodukte auf Basis anorganischer Farbpigmente, organische Solarzellen auf Taschen sowie Sensoren, gedruckte Leiterbahnen, gedruckte Antennen, Batterien und OLED-Bildschirme. Diese werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Von Industrieseite sind vor allem die Displayhersteller wie Sony, Panasonic, Samsung und LG zu nennen, die bereits OLED-Displays produzieren. Allerdings unterscheidet sich deren Herstellprozess nicht stark von den bereits aus der Displayproduktion bekannten Prozessen. Plastic Logic hat bereits Produktionskapazitäten für flexible Displays aufgebaut. Aber auch deren Produktionsprozess basiert nicht vollständig auf Druckverfahren. Im OPV-Bereich arbeiten Firmen wie Heliatek und Eight19 an organischen Solarzellen. Allerdings sind deren Produkte nicht gedruckt. Nur das Unternehmen Konarka hatte sich auf gedruckte Solarzellen spezialisiert und hierfür bereits eine Produktion aufgebaut. Allerdings musste die Firma Konarka am 01.06.2012 Insolvenz anmelden. Am 22.10.2012 wurde die deutsche Tochterfirma Konarka Technologies GmbH von der Belectric

¹⁸⁷ vgl. Das/Harrop (2007).

GmbH übernommen, welche die Forschung an organischen Solarzellen weiter vorantreiben wird.¹⁸⁸

2.2.1. Fertigungsverfahren für die druckbare Elektronik

Für die druckbare Elektronik sind Fertigungsverfahren notwendig, die Schichten definiert auf ein Substrat aufbringen. Dieser Vorgang wird häufig als Beschichten bezeichnet. Der Begriff ist nicht eindeutig definiert und wird in verschiedenen Branchen und Communities unterschiedlich verwendet. Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit, werden andere Bedeutungen des Begriffs in verschiedenen Branchen aufgelistet: Drucken, Coaten, Aufdampfen oder Lackieren. So ist die Bedeutung des Begriffs in der Druckbranche fest mit dem Fertigen von Druckerzeugnissen mittels Druckverfahren verbunden.¹⁸⁹ In der Coating-Branche wiederum ist dieser Begriff mit den eingesetzten Verfahren verbunden. Zum Teil werden in beiden Branchen im Kern gleiche Verfahren eingesetzt. Mattox (2010) wiederum unterscheidet in seiner Definition von Aufdampfverfahren die Begriffe „Thin Films“ und „Coatings“, die er anhand der erzeugten Schichtdicken definiert.¹⁹⁰

Aus den Beispielen wird deutlich, dass es viele Definitionen des Begriffs Beschichten gibt, und diese nicht auf die druckbare Elektronik angewendet werden können. Die Definitionen sind zu eingeschränkt, denn in der druckbaren Elektronik kommen Fertigungsverfahren unterschiedlicher Branchen zum Einsatz. Für die druckbare Elektronik muss dieser Begriff neu definiert werden.

Eine grundlegende Definition des Begriffs Beschichten ist in der DIN 8580 zu finden. Diese Norm gibt eine Einteilung über die Fertigungsverfahren. Dort gilt Beschichten als „Zusammenhalt vermehren“. Die Definition lautet: „Beschichten ist Fertigen durch Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff an ein Werkstück.“¹⁹¹ Diese Definition kann bei funktionalen Drucken nur zum Teil übernommen werden. Das „...Aufbringen einer fest haftenden Schicht...“ gilt auch für die druckbare Elektronik. Allerdings ist der Begriff „...aus formlosem Stoff...“ zu einengend, da neben Flüssigkeiten und Pulver auch direkt Foli-

¹⁸⁸ vgl. Photovoltaik.eu (o. J.).

¹⁸⁹ vgl. Kipphan (2001).

¹⁹⁰ vgl. Mattox (2010).

¹⁹¹ Deutsches Institut für Normung (2003).

en übertragen werden können. Auch der Begriff Werkstück passt für die druckbare Elektronik nicht, da dort in erster Linie auf Substrate beschichtet wird. So wird der Begriff des Beschichtens für diese Arbeit wie folgt definiert:

Beschichten ist das Fertigen durch Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus verschiedenen Materialien auf ein Substrat.

Für die druckbare Elektronik kommen sehr viele unterschiedliche Verfahren aus unterschiedlichen Branchen zum Einsatz, die sich zum Teil deutlich unterscheiden. Um diese darzustellen, bedarf es mehrerer Möglichkeiten diese zu unterscheiden bzw. zu gliedern. Denkbar ist die Gliederung nach dem *Umgebungsdruck*, dem *Aggregatzustand* des zu verarbeitenden Materials, der Art der *Materialdosierung*, dem *Zusammenhalt*, der *Auflösung*, der *Community*, der *Produktivität*, der *Fläche*, sowie nach der *Schichtdicke*.

Gliederung nach dem Umgebungsdruck

Die Gliederung nach dem Umgebungsdruck unterscheidet vakuumbasierte und vakuumlose Verfahren. Die meisten Verfahren können ohne Vakuum eingesetzt werden, während einige Verfahren eine evakuierte Umgebung voraussetzen (vgl. Kapitel 2.2.1.1 und Kapitel 2.2.1.2). Diese Unterscheidung ist nicht sehr verbreitet, ist aber gerade aus Produktionssicht sehr sinnvoll (vgl. Kapitel 4.2) und einfach durchzuführen.

Gliederung nach dem Umgebungsdruck:

- Vakuumbasierte Verfahren
- Vakuumlose Verfahren

Gliederung nach dem Aggregatzustand des zu verarbeitenden Materials

Die zu verarbeitenden Funktionsmaterialien können je nach Verfahren in unterschiedlichen Aggregatzuständen verarbeitet werden. Das Material kann in der flüssigen, gasförmigen oder festen Phase vorliegen. Da die meisten zu verarbeitenden Funktionsmaterialien in fester Form vorliegen, müssen diese, um sie mit Druckverfahren verarbeiten zu können, in die flüssige Phase gebracht werden. Dies geschieht normalerweise durch eine Versetzung der pulverförmigen Materialien mit Lösemittel. Die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Fluide werden Formulierungen genannt. Je nach Materialsystem können daraus Lösungen entstehen, bei denen das Material komplett in dem Lösemittel gelöst

wurde. Es können auch Emulsionen entstehen, oder das Material wird in dem Lösemittel dispergiert (s. Abb. 2.16). Funktionsfluid¹⁹² ist die flüssige Darreichungsform elektronischer Funktionsmaterialien, die nicht nur hinsichtlich dieser späteren Funktion, sondern auch in ihren Eigenschaften (Viskosität und Oberflächenspannung) in Bezug auf das jeweils anzuwendende Druck- oder Fertigungsverfahren spezifiziert ist. Das Funktionsfluid kann als Lösung, Emulsion oder Dispersion vorliegen.

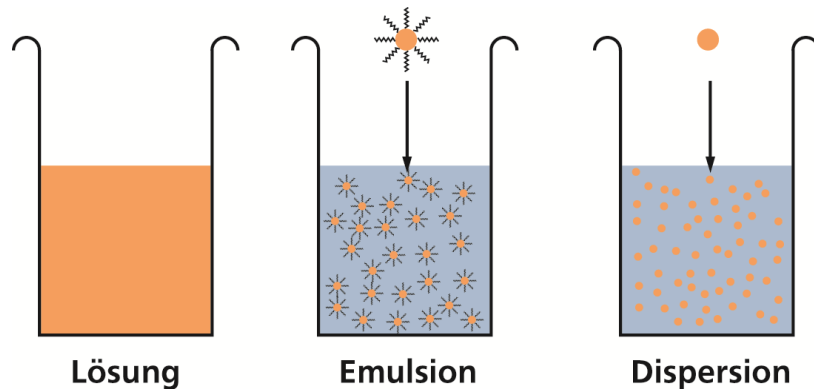


Abb. 2.16: Arten von Stoffgemischen für die druckbare Elektronik: Lösung, Emulsion und Dispersion.
Quelle: In Anlehnung an Søndergaard u. a. (2012)

Andere Verfahren wiederum bilden die Schicht aus dem gasförmigen Zustand des Funktionsmaterials. Diese Verfahren sublimieren das Material über verschiedene Wege direkt von dem festen Zustand in den gasförmigen Zustand. Trifft das Gas auf das Substrat, resublimiert es dort zu einer festen Schicht. Die dritte Gruppe von Verfahren verarbeiten die Materialien direkt aus der festen Phase. Das Material kann dabei als Pulver (beispielsweise bei der Elektrofotografie) oder als Folie (beispielsweise beim Kaltfolientransfer oder beim Heißprägen) vorliegen. Eine Unterscheidung in dieser Form ist bisher in der Literatur nicht erwähnt. Die Unterscheidung von Druckverfahren und Aufdampfverfahren wird allerdings in der druckbaren Elektronik häufig vorgenommen, so dass diese Gliederung konsequent erscheint.

Gliederung nach dem Aggregatzustand des zu verarbeitenden Materials:

- flüssige Phase (Flüssigkeiten)
- gasförmigen Phase (Dämpfe)
- festen Phase (Pulver, Folien)

¹⁹² Das Funktionsfluid wird häufig auch als Druckfluid bezeichnet.

Gliederung nach Art der **Materialdosierung**

Zum einen kann eine Flüssigkeit über eine Filmspaltung übertragen werden. Dabei berührt der übertragende Körper mit dem zu übertragenden Material das Substrat. Da bei einem solchen Vorgang nie die gesamte Flüssigkeit übertragen wird, sondern nur ein Teil davon, spricht man in diesem Fall von Filmspaltung.¹⁹³ Zum anderen kann eine Flüssigkeit über einen Meniskus übertragen werden. Dabei wird ein Flüssigkeitsfilm übertragen, ohne dass die Dosiereinrichtung das Substrat berührt. Das Fluid wird in einem Dosierkopf kontinuierlich zu einer Art „Vorhang“ dosiert, welcher sich zwischen der Dosiereinheit und dem Substrat ausbreitet. Die meisten dieser Verfahren werden als Coating-Verfahren bezeichnet. Eine Strukturierung ist mit dieser Technologie nur eingeschränkt parallel zur Bewegungsrichtung des Substrats möglich. Das Fluid bildet sich als eine Schicht auf dem Substrat aus.¹⁹⁴

Eine weitere Art der Materialdosierung ist die Dosierung über Tröpfchen. Hierbei werden verschiedene Möglichkeiten zur Tröpfchenerzeugung eingesetzt. Bei den Inkjet-Verfahren werden die Tröpfchen in dem Druckkopf erzeugt. Beispiele sind Drop on Demand oder Continuous Inkjet. Ein neueres Verfahren stellt der Aerosoljet da, bei dem sehr kleine Tröpfchen mit 1 bis 5 Mikrometern Durchmesser durch Zerstäubung entstehen. Dieses Aerosol wird durch einen Gasstrom zum Dosierkopf und somit auf das Substrat transportiert.¹⁹⁵

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, das Funktionsmaterial über ein Gas zu dosieren. Dabei wird das Material im gasförmigen Zustand auf das Substrat gebracht, wo es dann zu einer festen Schicht resublimiert.

Die letzte Möglichkeit der Materialdosierung ist die Feststoffdosierung. Dabei wird das Funktionsmaterial im festen Zustand auf das Substrat dosiert (vgl. Gliederung nach dem Aggregatzustand des zu verarbeitenden Materials). Dies kann durch ein Pulver oder eine Folie geschehen. Bei einer Pulverdosierung wird direkt das Pulver auf das Substrat aufgebracht, wo es dann unter Einwirkung von Energie fixiert wird. Die zweite Möglichkeit ist die Dosierung mit einer Folie, wobei die Schicht direkt als Folie mit Hilfe von Kleber sowie Druck und Temperatur auf das Substrat aufgebracht wird.

¹⁹³ vgl. Hübner (1991).

¹⁹⁴ vgl. Søndergaard u. a. (2012).

¹⁹⁵ vgl. Clemens u. a. (2011).

Gliederung nach Art der Materialdosierung:

- Dosierung über Filmspaltung
 - Hochdruck
 - Flachdruck
 - Tiefdruck
 - Durchdruck
- Dosierung über Meniskus
- Dosierung über Tröpfchen
- Dosierung über Gasstrom
 - PVD
 - Sputtern
- Dosierung über Feststoff
 - Pulver
 - Folie

Gliederung nach dem **Zusammenhalt**

Die Bezeichnungen dieser Gliederung orientieren sich an der DIN 8580. Dabei werden die Verfahren danach unterschieden, ob sie den Zusammenhalt mehr, vermindern oder beibehalten. Additive Verfahren wie das Tiefdruckverfahren mehr den Zusammenhalt, indem sie Funktionsmaterial auf das Substrat bringen. Subtraktive Verfahren wie die Laserablation mindern den Zusammenhalt, indem sie Material von dem Substrat entfernen. Strukturierende (Patterning) Verfahren wie das Wetting- De-Wetting-Verfahren wiederum ändern nichts an dem Zusammenhalt, da diese nur die Oberflächenspannung verändern, damit eine folgende Schicht strukturiert wird.

Gliederung nach dem Zusammenhalt:

- | | |
|------------------------|-----------------|
| - Schaffen / Vermehren | (Additiv) |
| - Vermindern | (Subtraktiv) |
| - Beibehalten | (Strukturieren) |

Gliederung nach der **Auflösung**

Die Fertigungsverfahren für die druckbare Elektronik unterscheiden sich zum Teil sehr deutlich in ihrer Auflösung. So erreichen subtraktive Verfahren wie die Photolithographie Auflösungen von ca. 20 nm, während Coating-Verfahren nicht strukturiert auftragen können. Konventionelle Druckverfahren erreichen in der Produktion Auflösungen von 20 μm und unter Laborbedingungen auch

unter $10\text{ }\mu\text{m}$. Da die Auflösungen einen sehr großen Bereich umfassen, scheint eine exakte Abgrenzung dieser Begriffe sehr schwierig. Für diese Arbeit wird daher folgende Definition gewählt: Eine hohe Auflösung liegt bei $1\text{ }\mu\text{m}$ oder weniger vor. Eine niedrige Auflösung liegt über $100\text{ }\mu\text{m}$. Verfahren mit mittlerer Auflösung liegen dazwischen.

Gliederung nach der Auflösung:

- Hohe Auflösung $< 1\text{ }\mu\text{m}$
- Mittlere Auflösung $1\text{ }\mu\text{m} < \text{und} < 50\text{ }\mu\text{m}$
- Niedrigere Auflösung $> 50\text{ }\mu\text{m}$

Gliederung nach Community

Wie bereits erwähnt, kommen bei der Fertigung von druckbarer Elektronik Verfahren verschiedener Branchen zum Einsatz. Auch wenn alle diese Verfahren Beschichtungsverfahren sind, sind diese Verfahren in unterschiedlichen Branchen entwickelt worden.

Gliederung nach der Community:

- Drucken
- Coaten
- Aufdampfen

Gliederung nach der Produktivität

Die Fertigungsverfahren für die druckbare Elektronik weisen teilweise deutlich Unterschiede in ihrer Produktivität auf. So erreichen die größten Druckmaschinen einen Output von über 240.000 m^2 pro Stunde¹⁹⁶, während bei den schnellsten Aufdampfverfahren maximal 1.300 m^2 pro Stunde erreichbar sind.¹⁹⁷ Im Herstellprozess von siliziumbasierter Hochleistungselektronik mittels Aufdampfverfahren und Photolithographie werden lediglich einige Quadratmeter pro Stunde erzeugt.¹⁹⁸

Eine exakte Abgrenzung zwischen den verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen erscheint sehr schwierig. Da es sich um Unterschiede von einigen Größenordnungen handelt, kommt es für eine sinnvolle Abgrenzung nicht auf wenige

¹⁹⁶ Diese Angaben gelten für die Rollentiefdruckmaschine TR 12B/432 des Herstellers KBA AG.

¹⁹⁷ Bräuer (1999).

¹⁹⁸ vgl. Huebler u. a. (2002). Der Output der siliziumbasierter Hochleistungselektronik wird in Wafern gemessen.

Prozentpunkte an. Für diese Arbeit wird daher folgende Definition gewählt: Eine hohe Produktivität ist ab einem Output von mehr als 10.000 m²/h erreicht. Eine niedrige Produktivität ist definiert unter 1.000m²/h. Verfahren mit mittlerer Produktivität liegen dazwischen.

Gliederung nach dem Produktivität:

- | | |
|----------------------------|--|
| - Hohe Produktivität | > 10.000 m ² /h |
| - Mittlere Produktivität | 1.000 < und < 10.000 m ² /h |
| - Niedrigere Produktivität | < 1.000 m ² /h |

Gliederung nach der Fläche

Eine Einteilung der Fertigungsverfahren nach der Fläche bietet sich an, da sich die Verfahren sehr stark darin unterscheiden, ob sie für sehr feine Strukturen oder für sehr große Flächen geeignet sind. Eine exakte Abgrenzung dieser Begriffe erscheint sehr schwierig, so dass hier die drei Begriffe strukturiert, Vollfläche und Large Area unterschieden werden. Die Fläche beschreibt dabei die Größe einer einzelnen ununterbrochenen Schicht, die mit einem Prozessschritt erzeugt werden kann. Zur Unterscheidung wird allerdings nicht der Flächeninhalt herangezogen, sondern die kleinste Kantenlänge. Bei strukturierten Flächen wird diese in Millimetern angegeben, bei Vollflächen mindestens in Zentimetern und bei Large Area wird diese in Metern gemessen.

Gliederung nach der Fläche (kleinste Kantenlänge):

- | | | |
|----------------|------------------------------|------|
| - Large Area | Größenordnung in Metern | [m] |
| - Vollfläche | Größenordnung in Zentimetern | [cm] |
| - Strukturiert | Größenordnung in Millimetern | [mm] |

Ein wichtiger Faktor ist dabei der Einfluss der Randeffekte. Diese sind verfahrensabhängig und spielen vor allem bei kleinen Flächen eine große Rolle. So ist nachvollziehbar, dass bei einer 50 µm dünnen Linie ein Randeffekt von wenigen Mikrometern einen prozentual größeren Effekt auf die Funktion der Schicht hat, als bei einer 8 mm breiten Linie.

Gliederung nach der Schichtdicke

Je nach Device und Device-Layout sind unterschiedliche Schichtdicken von wenigen Nanometern bis einigen hundert Mikrometern notwendig. Mit den Fertigungsverfahren der druckbaren Elektronik können unterschiedlich dicke

Schichten erzeugt werden. Abhängig von den Material- und Prozessparametern können mit den jeweiligen Verfahren Schichtdicken in einer bestimmten Bandbreite erzeugt werden. Daher erscheint die Unterscheidung der Fertigungsverfahren nach der Schichtdicke hilfreich. Eine exakte Abgrenzung dieser Begriffe erscheint sehr schwierig. Eine sinnvolle Abgrenzung für dicke und dünne Schichten scheint hier die Schwelle von einem Mikrometer zu sein.

Gliederung nach der Schichtdicke:

- Dünnschicht \sim ($< \sim 1\mu\text{m}$) Größenordnung in Nanometern [nm]
- Dickschicht \sim ($> \sim 1\mu\text{m}$) Größenordnung in Mikrometern [μm]

Für die folgenden Unterkapitel wird die Gliederung nach der Sensibilität der Verfahren bezüglich des Umgebungsdrucks genutzt. Dadurch fallen alle Aufdampfverfahren in eine extra Gruppe, da sie eine evakuierte Umgebung benötigen. Diese Verfahren werden in Kapitel 2.2.1.2 dargestellt. Zunächst werden in dem folgenden Unterkapitel die Fertigungsverfahren vorgestellt, die unter normalen Umgebungsdruck betrieben werden können.

2.2.1.1. Vakuumlose Fertigungsverfahren

Die folgende Auflistung zeigt mehr als 40 mögliche Fertigungsverfahren, die für die druckbare Elektronik einsetzbar sind. Zusammen mit den Aufdampfverfahren, existieren insgesamt mehr als 50 Verfahren für die druckbare Elektronik. Um diese alle übersichtlich darzustellen, wird diese Gruppe erneut unterteilt in additive, subtraktive und strukturierende Verfahren. Die additiven Verfahren werden erneut in Druck- und Coating-Verfahren unterteilt. Die Verfahren werden in dieser Auflistung einheitlich englisch dargestellt, da für viele dieser Verfahren keine deutsche Übersetzung existiert. Nicht alle dieser Verfahren eignen sich gleich gut für die Herstellung von druckbarer Elektronik. In der Literatur wurden bereits viele dieser Verfahren beschrieben und auf die Eignung für druckbare Elektronik getestet.¹⁹⁹

¹⁹⁹ vgl. Gamota u. a. (2004); Dörsam (2011); Gonzalez-Macia u. a. (2010); Clemens u. a. (2011).

Tabelle 2.3: Übersicht über die vakuumlosen Fertigungsverfahren

additiv		subtraktiv	strukturierend
Drucken	Coaten		
1	gravure printing	brush coating	laser ablation
2	gravure offset printing	spin coating	photo lithography
3	flexo printing	blade coating	etching
4	offset printing	pad application	
5	reverse offset printing	hand roller application	
6	screen printing	spray coating	
7	inkjet printing	flow coating	
8	aerosoljet printing	knife system	
9	laser transfer printing	double side system	
10	xerography printing	commabar system	
11	pad printing	case knife system	
12	hot stamping	engraved eoller system	
13	micro plasma printing	2 roller system	
14	syringe deposition	3 roller combi system	
15		micro roller system	
16		5 roller system	
17		reverse roll system	
18		rotary screen system	
19		dipping system	
20		slot die system	
21		curtain coating system	
22		hotmelt slot die system	
23		powder scattering system	
24		tape coating	

Im folgenden Abschnitt werden drei Verfahren vorgestellt, die aus heutiger Sicht in der Produktion von druckbarer Elektronik eingesetzt werden können. Diese sind in Tabelle 2.3 blau markiert. Das Tiefdruckverfahren wird zunächst ausführlich beschrieben. Danach werden kurz die Verfahren Flexodruck und Siebdruck erklärt.

Tiefdruck

Zunächst wird der schematische Aufbau und Ablauf des Tiefdruckverfahrens beschrieben, wie es in Abb. 2.17 dargestellt ist. Generell werden dafür zwei Zylinder eingesetzt: Druckformzylinder und Presseur.²⁰⁰ Zur Übertragung des Funktionsfluids sind in den Druckformzylinder Näpfchen in Form des Druck-

²⁰⁰ Presseur wird auch Gegendruckzylinder genannt.

bilds eingraviert.²⁰¹ Der Prozess startet zunächst mit dem Befüllen der Nöpfchen mit dem Funktionsfluid. Hierfür rotiert der Druckformzylinder in der mit Fluid gefüllten Farbwanne.²⁰² Das überschüssige Fluid wird von der Rakel abgestriffen (abgerakelt). Danach kommt der Druckformzylinder und das in den Nöpfchen befindliche Fluid mit dem Substrat in Kontakt. Die notwendige Kraft für die Übertragung des Fluids wird durch den Presseur aufgebracht. Dieser Bereich des Kontakts mit dem Substrat wird Druckzone genannt. Hier wird das Fluid auf das Substrat übertragen.

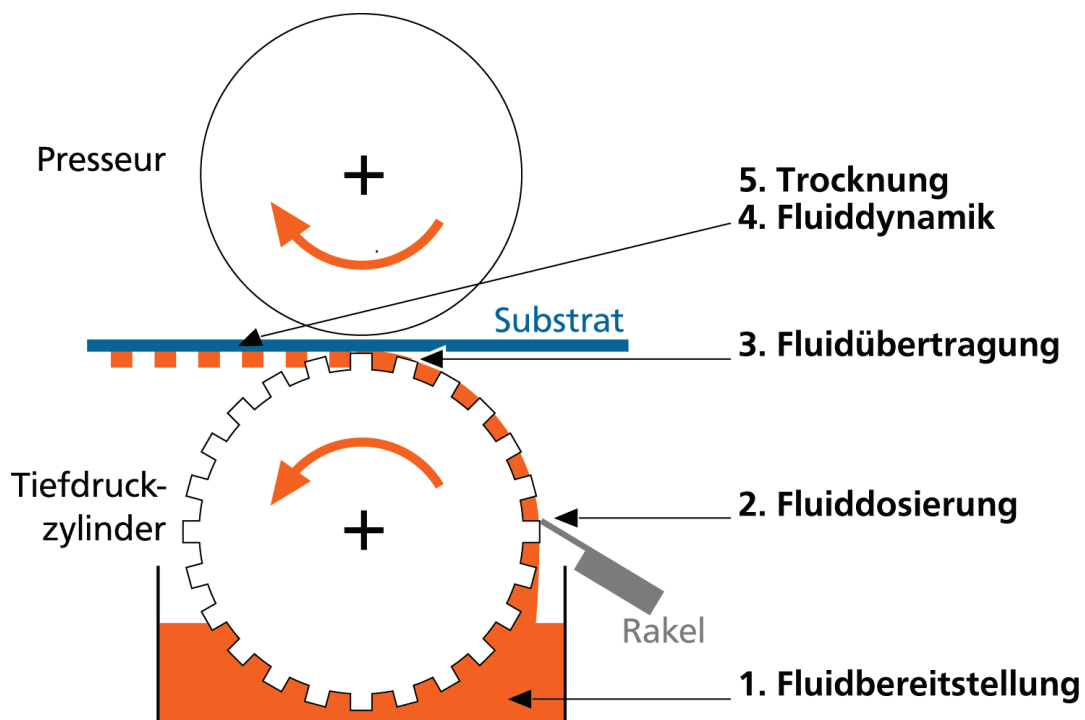


Abb. 2.17: Schematische Darstellung des Tiefdruckverfahrens
 Quelle: In Anlehnung an Stahl, Dörsam (2012) und Bornemann (2012)

Neben dem hier vorgestellten Tiefdruckverfahren existieren noch weitere Varianten. So können statt den Nöpfchen auch direkt feine Linien graviert werden. Diese Art des Tiefdrucks nennt sich Intaglio bzw. Stichtiefdruck und wird vor allem im Wertpapierdruck eingesetzt. Außerdem kann das Verfahren auch indirekt ausgeführt werden, indem das Fluid aus den Nöpfchen zunächst auf einen „Transferzylinder“ übertragen wird, und von dort dann erst auf das Substrat

²⁰¹ Die Nöpfchen haben üblicherweise eine Rasterweite von 70 bis 250 μm und eine Tiefe von 18 bis 64 μm bei einem angenommenen Schneidwinkel von 140°. Vgl. Thieme (2012).

²⁰² Für die Farbzuführung existieren auch andere technische Lösungen wie beispielsweise eine geschlossene Kammerrakel oder mit Anspühlwalze.

übertragen wird.²⁰³ Eine weitere Sonderform des indirekten Tiefdrucks stellt der Tampondruck dar.²⁰⁴ Bornemann (2012) untersucht für den Tiefdruckprozess den Weg des Fluids vom Reservoir bis auf das Substrat und definiert hierfür fünf Teilprozesse. Wie in Abb. 2.17 dargestellt, folgen nach dem Übertragen des Fluids auf das Substrat noch zwei Teilprozesse.²⁰⁵ Diese Teilprozesse sind aktuell Gegenstand der Forschung.

Der *erste Teilprozess* ist das Befüllen der Nöpfchen mit dem Funktionsfluid (1). Hier kann beobachtet werden, dass nicht alle Nöpfchen vollständig befüllt werden und Luft eingeschlossen wird, was zu einer Verringerung des übertragbaren Volumens führt. Außerdem kann es zur Trocknung von Fluidresten in den Nöpfchen kommen.²⁰⁶

Der *zweite Teilprozess* ist das Abrakeln des überschüssigen Fluids (2). Hierfür wird ein Rakelmesser unter definierten Winkel (45-80°) an den Druckformzylinder angepresst. Die Rakel gleitet dabei auf einem sehr dünnen Flüssigkeitsfilm auf den ungravierten Stellen des Zylinders. Dieser dünne Fluidfilm überträgt somit auch auf den nicht-druckenden Bereichen Funktionsfluid und kann daher die Funktion von Devices beeinträchtigen.²⁰⁷ Um den Verschleiß zu reduzieren und die Druckqualität aufrechtzuerhalten, changiert die Rakel auf dem Druckformzylinder.²⁰⁸ Ein Problem sind die in der druckbaren Elektronik häufig eingesetzten leicht flüchtigen Lösemittel, da diese zum Teil so schnell verdampfen, dass das Funktionsfluid auf der Druckform noch vor der Fluidübertragung „eintrocknet“.

Im *dritten Teilprozess* wird das Fluid auf das Substrat übertragen (3). Der Presseur drückt das Substrat gegen den Druckformzylinder und bringt es so mit dem Fluid in Kontakt. Das Fluid benetzt das Substrat und wird aus den Nöpfchen gezogen. Es kommt zu einer Farbspaltung; d. h. nur ein Teil des Fluids aus den Nöpfchen (ca. 30-60%) wird übertragen.

²⁰³ vgl. Pudas (2004).

²⁰⁴ vgl. Kipphan (2001).

²⁰⁵ vgl. Stahl/Dörsam (2012a); Bornemann (2012).

²⁰⁶ vgl. Brethour (2001).

²⁰⁷ vgl. Bornemann u. a. (2011).

²⁰⁸ vgl. Gillett (2003).

Im *vierten Teilprozess* kommt es noch vor und während der Trocknung zu fluid-dynamischen Vorgängen. Dieser Teilprozess wird auch „Schichtabscheidung“ genannt. Hierbei sollte sich aus den einzelnen Tropfen aus den Nöpfchen ein homogener Film bilden. Im schlechtesten Fall kommt es zu einer Entnetzung des Fluids auf dem Substrat. Die genauen Vorgänge dieses Teilprozesses sind Gegenstand der Forschung.²⁰⁹

Der *fünfte Teilprozess* ist das Trocknen des Films. Hier kommt es zur Schichtabscheidung, in dem das Lösemittel verdampft und nur noch das Funktionsmaterial auf dem Substrat bleibt.

Dieser auf den ersten Blick einfache Prozess erscheint bei näherer Betrachtung als sehr komplex und ist zurzeit noch Gegenstand der Forschung.²¹⁰ Einflussgrößen sind unter anderem:

- 1) Fluid
- 2) Substrat
- 3) Druckform
- 4) Maschinenparameter
- 5) Umgebungsbedingungen

Flexodruck

Flexodruck wird in erster Linie im Verpackungsdruck zum Bedrucken von Kartons und Folie eingesetzt. Zunächst wird der Aufbau eines Flexodruckwerks wie in Abb. 2.18 dargestellt beschrieben. Meist werden im Flexodruck drei Zylinder eingesetzt: Rasterwalze, Druckformzylinder und Gegendruck-zylinder. Das Fluid wird im Flexodruck durch die erhöhten Bereiche auf der Druckform, dem Druckform²¹¹, auf das Substrat übertragen.

Der Prozess startet zunächst mit dem Befüllen der Nöpfchen der Rasterwalze mit dem Funktionsfluid. Analog zum Tiefdruck wird das überschüssige Fluid mit der Rakel abgerakelt. Die Rasterwalze kommt mit dem Druckform in Berührung und überträgt das Fluid auf das Druckform. Danach kommt das Druckform mit dem auf den Plateaus befindlichem Fluid mit dem Substrat in Kontakt. Die für den Fluidübertrag notwendige Kraft wird durch den Gegendruckzylinder

²⁰⁹ vgl. Bornemann (2012).

²¹⁰ vgl. Stahl/Sauer/Dörsam (2012).

²¹¹ Beim Flexodruck liegt die Druckform als Klischee oder Sleeve vor.

der aufgebracht. Dieser Bereich des Kontakts mit dem Substrat wird Druckzone genannt. Hier wird das Fluid auf das Substrat übertragen. Dörsam (2011) beschreibt für den Flexodruckprozess den Weg des Fluids vom Reservoir bis auf das Substrat und definiert hierfür analog dem Tiefdruck sechs Teilprozesse. Wie in Abb. 2.18 dargestellt, folgen nach dem Übertragen des Fluids auf das Substrat noch zwei Teilprozesse.²¹²

Der *erste Teilprozess* ist das Befüllen der Näpfchen der Rasterwalze mit dem Funktionsfluid (1). Hier können ähnliche Probleme bei der Näpfchenbefüllung auftreten wie zuvor beim Tiefdruck beschrieben.

Der *zweite Teilprozess* ist das Abrakeln des überschüssigen Fluids (2). Während das Rakelmesser beim Tiefdruck „streichend“ unter einem Winkel von 45 bis 80° angestellt wird,²¹³ wird die Rakel beim Flexodruck „stechend“²¹⁴ unter einem Winkel von 30 bis 40° an die Rasterwalze angestellt.²¹⁵ Dies liegt vor allem daran, dass beim Flexodruck meistens ein Kammerrakelsystem zum Einsatz kommt, welches nur bei einer stechend angestellten Rakel dicht ist. Kommt eine Farbwanne wie in Abb. 2.18 zum Einsatz, kann auch beim Flexodruck die Rakel „streichend“ angestellt werden.

Im *dritten Teilprozess* wird das Fluid von der Rasterwalze auf die Druckform übertragen. Hierbei findet die eigentliche Dosierung statt, da nur Fluid auf die erhabenen Stellen der Druckform übertragen wird (3). Folglich stellt der dünne Fluidfilm auf den Stegen der Rasterwalze im Flexodruck kein Problem dar.

Im *vierten Teilprozess* wird das Fluid auf das Substrat übertragen (4). Der Gegendruckzylinder drückt das Substrat gegen den Druckformzylinder und bringt es mit dem Fluid in Kontakt. Das Fluid benetzt das Substrat und es kommt zu einer Filmspaltung. Das schnelle Verdunsten von leicht flüchtigen Lösemittel ist im Flexodruck noch eine größere Herausforderung als im Tiefdruck, da der Weg vom Fluidreservoir bis zum Substrat länger ist und somit das Fluid in dieser Zeit „eintrocknen“ kann.

²¹² vgl. Dörsam (2011); Stahl/Dörsam (2012a).

²¹³ vgl. Stahl/Dörsam (2012a). In speziellen Fällen wird die Rakel auch auf bis zu 45 bis 80° eingestellt.

²¹⁴ Bei älteren Flexodruckmaschinen wurde zum Teil die Rakel auch noch streichend angestellt. Bei den meisten modernen Flexodruckmaschinen kommt ein Kammerrakelsystem zum Einsatz, bei dem die Rakel stechend angestellt wird.

²¹⁵ vgl. Schulz (1987).

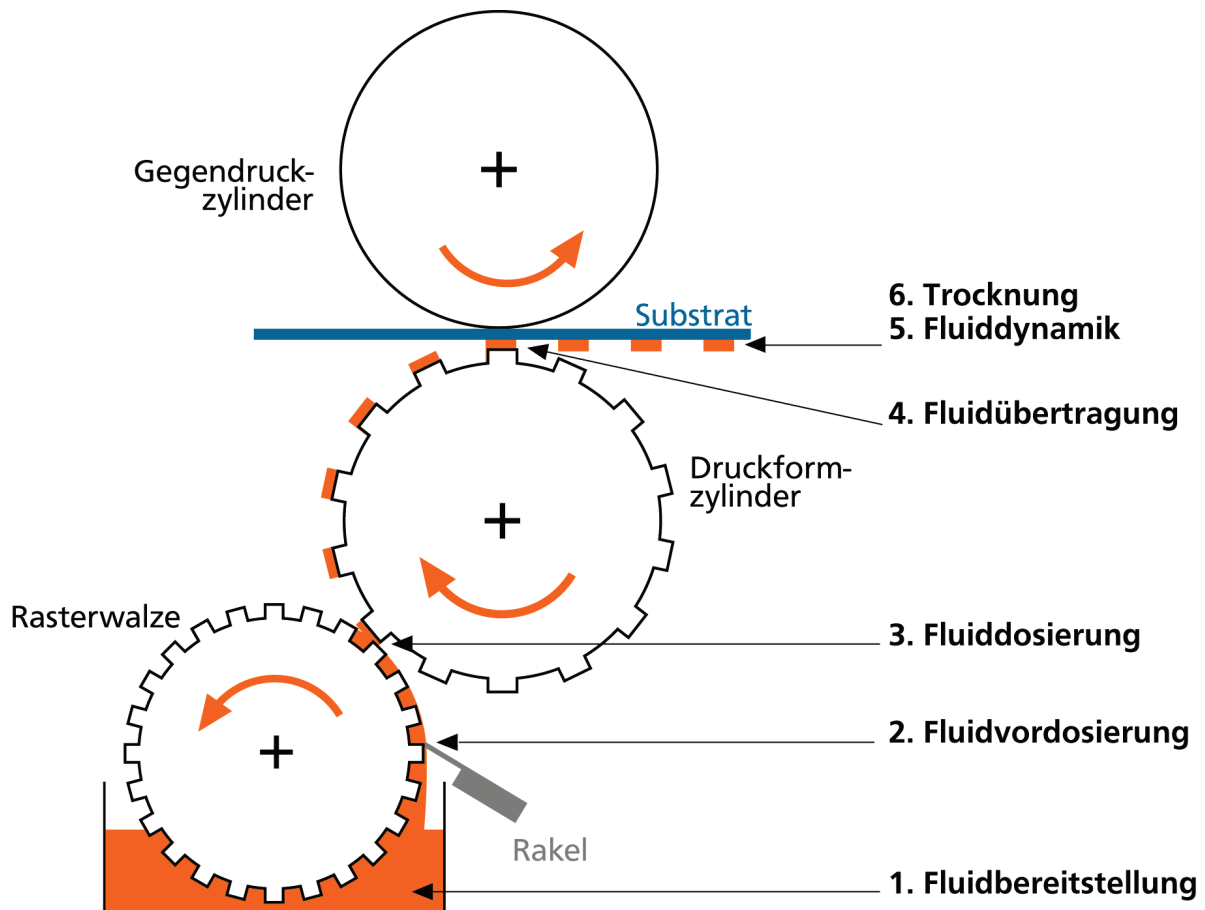


Abb. 2.18: Schematische Darstellung des Flexodruckverfahrens
 Quelle: In Anlehnung an Stahl, Dörsam (2012) und Dörsam (2011)

Im *fünften Teilprozess* kommt es zur Schichtabscheidung, in dem das Lösemittel verdampft und nur noch das Funktionsmaterial auf dem Substrat bleibt. Während der Trocknung kommt es zu fluiddynamischen Vorgängen, dem sogenannten Leveling (5). So können Konzentrationsgradienten starke dynamische Vorgänge im Fluid auslösen, welche die zu erzeugende Schicht stark beeinflussen. Die genauen Vorgänge dieses Teilprozesses sind, ähnlich beim Tiefdruck, Gegenstand der Forschung.²¹⁶

Der *sechste Teilprozess* ist das Trocknen des Films, bei dem das Lösemittel verdampft und nur noch das Funktionsmaterial auf dem Substrat übrig bleibt (6).²¹⁷

²¹⁶ vgl. Bornemann (2012).

²¹⁷ vgl. Stahl/Dörsam (2012a).

Siebdruck ist vor allem von dem Bedrucken von Textilien bekannt. Allerdings wird Siebdruck bereits seit vielen Jahrzehnten in der Produktion druckbarer Elektronik eingesetzt. Das Druckbild entsteht dadurch, dass das Fluid durch feine Öffnungen in einem Sieb auf das Substrat gedrückt werden. Zunächst wird der Aufbau eines Siebdruckwerks, wie in Abb. 2.19 dargestellt, beschrieben. In diesem Abschnitt wird der Flachbettsiebdruck erklärt. Eine weitere Variante ist der Rollensiebdruck. Dörsam (2011) beschreibt den Siebdruckprozess in sechs Teilprozessen. Im *ersten Teilprozess* wird zunächst das Funktionsfluid auf nicht druckende Stellen des Siebs mit einer Dosiervorrichtung aufgebracht (1). Mit einer Flutrakel wird das Fluid über das Sieb vordosiert (2). Im *dritten Teilprozess* wird das Fluid von der Rakel durch die offenen Stellen des Siebes gedrückt. Dies ist der eigentliche Dosiervorgang (3).



65

Substrat (5). Der *sechste Teilprozess* ist das Trocknen des Films, bei dem das Lösemittel verdampft und nur noch das Funktionsmaterial auf dem Substrat übrig bleibt (6).²¹⁸

Siebdruck kann auf Bogen- und auf Rollensubstraten eingesetzt werden. Dabei erreicht das Siebdruckverfahren nicht die Produktivität von Tief- oder Flexodruck. So sind beim Rollensiebdruck üblicherweise Geschwindigkeiten von maximal 80 m/min.²¹⁹ Allerdings können mit dem Siebdruckverfahren relativ dicke Schichten von 1 bis zu 300 μm erreicht werden.²²⁰ Deshalb eignet sich das Verfahren vor allem um Leiterbahnen zu drucken. So werden beispielsweise die Leiterbahnen bei Solarzellen im Siebdruck hergestellt.²²¹

2.2.1.2. Vakuumbasierte Fertigungsverfahren

Im Unterschied zu den zuvor vorgestellten Verfahren, die das Material im flüssigen Zustand verarbeiten, wird das Material bei Verfahren der Gasphasenabscheidung im gasförmigen Zustand auf das Substrat aufgebracht, wo es dann resublimiert und eine Schicht bildet. Prinzipiell lassen sich die chemische und physikalische Gasphasenabscheidung unterscheiden.²²² Abbildung Tabelle 2.4 vergleicht die drei Klassen an Gasphasenabscheidung: Verdampfungsverfahren, Sputterverfahren und chemische Gasphasenabscheidungsverfahren und zeigt deren grundlegenden Unterschiede auf. In dieser Arbeit wird auf die chemische Gasphasenabscheidung²²³ nicht näher eingegangen, da diese Verfahren bisher bei der Herstellung von druckbarer Elektronik keine große Bedeutung haben. Deshalb steht in dieser Arbeit der Begriff Aufdampfverfahren für alle Verfahren der physikalischen Gasphasenabscheidung.²²⁴ Die Verfahren des PVD werden grundsätzlich in Verdampfungsverfahren und Sputterverfahren aufgeteilt. Die verschiedenen Unterverfahren sind in Tabelle 2.5 dargestellt.

Bei allen Verfahren der physikalischen Gasphasenabscheidung liegt das abzuscheidende Material in fester Form vor. Ziel dieser Verfahren ist nun das feste

²¹⁸ vgl. Dörsam (2011).

²¹⁹ vgl. Euler (2012).

²²⁰ vgl. Clemens u. a. (2011).

²²¹ vgl. Frey u. a. (2011b).

²²² vgl. Bunshah (2001).

²²³ engl. chemical vapour deposition, kurz CVD

²²⁴ Engl. physical vapour deposition, kurz PVD

Material zu verdampfen, um es so gezielt auf das Substrat aufzubringen. Hierfür wird Energie in das Material, Target genannt, eingebracht. Der Unterschied zwischen den Verdampfungsverfahren und den Sputterverfahren liegt in der Art der Erzeugung des Dampfes. Bei den Verdampfungsverfahren wird das feste Material durch Erhitzen erzeugt. Dies kann durch eine elektrische Heizung, eine Lichtbogenentladung oder mit Laserstrahlen geschehen. Bei den Sputterverfahren werden Teilchen beschleunigt und auf das Material geschossen. Dies können beispielsweise magnetisch abgelenkte Ionen oder Elektronen sein. Durch den Impulsübertrag können von dem Target kleinste Teilchen aus dem Materialverbund gelöst werden. Die Teilchen, die aus dem Target gelöst wurden, haben je nach Verfahren unterschiedliche Energien. Bei den Aufdampfverfahren haben die Teilchen eine niedrige Energie von bis zu 0,5 eV, während die Teilchen im Sputterprozess eine Energie von bis zu 100 eV besitzen.

Tabelle 2.4: Vergleich von Verdampfungs-, Sputter- und chemische Gasphasenabscheidungsverfahren.
Quelle: In Anlehnung an Bunshah (2001)

	Aufdampfen	Sputtern	Chemical Vapor Deposition
Sublimation durch	Wärmeenergie	Impulsübertragung	Chemische Reaktion
Abscheidung von	Atome und Ionen	Atome und Ionen	Atome
Abscheidungsrate	Kann sehr hoch sein (bis zu 750.000 Å/min)	Niedrig (außer Metalle bis 10.000 Å/min)	Mäßig (200 bis 2.500 Å/min)
Abscheidung von Metallen	Ja	Ja	Ja
Abscheidung von Nichtmetallen	Ja	Ja	Ja
Energie der abgeschiedenen Teilchen	Niedrig (0,1 bis 0,5 eV)	Kann hoch sein (1 bis 100 eV)	Kann hoch sein (mit Plasma unterstützter CVD)
Beeinflussung des Substrats durch	In der Regel nicht	Ja	möglich
Erwärmung des Substrats	Ja, in der Regel	In der Regel nicht	Ja

Der so entstehende Dampf kann entweder ballistisch oder durch elektrische Felder auf das Substrat bewegt werden. Der Dampf besteht dabei aus Atomen, Ionen und größeren Clustern. Die Mischung dieser Bestandteile im Dampf ist

von dem Verfahren und den eingesetzten Targets abhängig. Damit das dampfförmige Material das Substrat erreicht, muss die Umgebung evakuiert werden. Der typische Arbeitsdruck liegt bei den PVD-Verfahren im Bereich von 10^{-8} Pa bis ca. 10^{-3} Pa. Unter normaler Atmosphäre würde das Material durch Streuung an den Gasteilchen abgelenkt und es könnte keine homogene Schicht auf dem Substrat abgeschieden werden. Das dampfförmige Material bewegt sich je nach Verfahren frei im Raum und kondensiert nicht nur auf dem Substrat, sondern auch auf den Wänden des Gehäuses. Um das zu verringern, werden zum einen die Wände beheizt und zum anderen das gasförmige Material durch elektrische Felder auf das Substrat gelenkt. Um die Homogenität der Schicht auf dem Substrat zu verbessern, rotieren die Substrate. Durch die Rotation des Substrats können noch andere Effekte erzielt werden. So können bei dem gleichzeitigen Einsatz mehrerer Targets unterschiedlichen Materials, Materialgemische auf dem rotierenden Substrat erzeugt werden. Die nun auf das Substrat treffenden Dampfteilchen resublimieren an der Oberfläche und lagern sich dort ab. Auf der Substratoberfläche kommt es danach zu Oberflächendiffusion. Das sind Bewegungen der Moleküle, da diese einen energetisch günstigen Platz bevorzugen.²²⁵ Je nach Energie der Teilchen können diese dadurch auch die Eigenschaften des Substrats verändern.

Tabelle 2.5: Überblick über die Verfahren der physikalischen Gasphasenabscheidung
Quelle: In Anlehnung an Mattox (2010) und Bunshah (2001)

Physikalischen Gasphasenabscheidung		
Verdampfungsverfahren	Sputterverfahren	Sonstige
Thermisches Verdampfen Elektronenstrahlverdampfen Laserstrahlverdampfen Lichtbogenverdampfen Molekularstrahlepitaxie	DC-Sputtern HF-Sputtern Ionenstrahlsputtern Magnetronsputtern Reaktives Sputtern	Ionenplattieren ICB-Deposition

Um eine Aufdampfanlage zu betreiben, sind folgende Prozessschritte notwendig: Chargieren und Evakuieren der Vakuumkammer, Beheizen der Targets und Beschichten des Substrats, Belüften, Öffnen und Entnahme der beschichteten

²²⁵ vgl. Mattox (2010); Bunshah (2001).

Teile.²²⁶ Dieser Prozess kann zeitlich optimiert werden, in dem Schleusen eingesetzt werden, so dass die Vakuumkammer nicht immer komplett evakuiert werden muss. Zum anderen kann während des Aufdampfprozesses die Schleuse davor gleichzeitig evakuiert werden, so dass dadurch viel Zeit gespart wird.²²⁷ Wie Abb. 2.20 zeigt, gibt es für Vakuumanlagen verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten. Mattox (2010) unterscheidet dabei sechs verschiedene Systeme. Erstens die Direktbeladungsanlage (Direct-load coater). Das zweite System hat zusätzlich eine Schleusenanlage. Beim dritten System, der Inlineanlage (In-line coater), wird das Substrat durch eine Schleuse eingebracht und durch eine andere gegenüberliegende Schleuse ausgebracht. Bei der vierten Anlage, dem Cluster-Tool, teilen sich mehrere Vakuumkammern eine gemeinsame Schleuse. Die Systeme fünf (Roll coater batch) und sechs (Roll coater air-to-air) sind für Rollensubstrate ausgelegt. Beim fünften System wird die komplette Rolle in das Vakuum eingebracht, während beim sechstens System die Substratbahn durch das Vakuum gezogen wird, und die Ab- und Aufrolleinheit befindet sich außerhalb des Vakuums.²²⁸

Es existieren Anlagen, die Substrate bis zu einer Größe von 3,2 m auf 6 m beschichten können.²²⁹ Anlagen, die für Beschichtung von Glasscheiben (meist mit ITO) konzipiert sind, erreichen dabei einen Durchsatz von bis zu $1.300 \text{ m}^2/\text{h}$. Die mittlere Depositionsrate für diese einfachen Anwendungsfälle beträgt in etwa $1,5 \text{ nm/s}$.²³⁰ So kommen beim Aufdampfverfahren meist nur Bogensubstrate zum Einsatz. Hans u. a. (2000) zeigen, dass die Kostenunterschiede beim Batch-Betrieb und einem Inline-Betrieb bei dicken Schichten gering sind, weil hier die Beschichtungszeit gegenüber der Rüstzeit deutlich länger ist.²³¹ Da bei der druckbaren Elektronik viele Schichten sehr dünn aufgetragen werden müssen, kann sich ein Inline-Betrieb lohnen. So gibt es auch Anlagen, bei denen Rollensubstrate zum Einsatz kommen. Wie in Abb. 2.20 gezeigt, existieren Anlagen, bei denen die komplette Substratrolle in die Vakuumkammer eingebracht wird (Roll coater – batch) und Anlagen, bei denen die Substratbahn durch ein Vakuum geführt wird (Roll coater – air to air).

²²⁶ vgl. Engers/Bauer (1999).

²²⁷ vgl. Bergauer/Eisenmenger-Sittner (2006).; vgl. Engers/Bauer (1999).

²²⁸ vgl. Mattox (2010).

²²⁹ vgl. Beister u. a. (1995).

²³⁰ vgl. Bräuer (1999).

²³¹ vgl. Hans u. a. (2000).

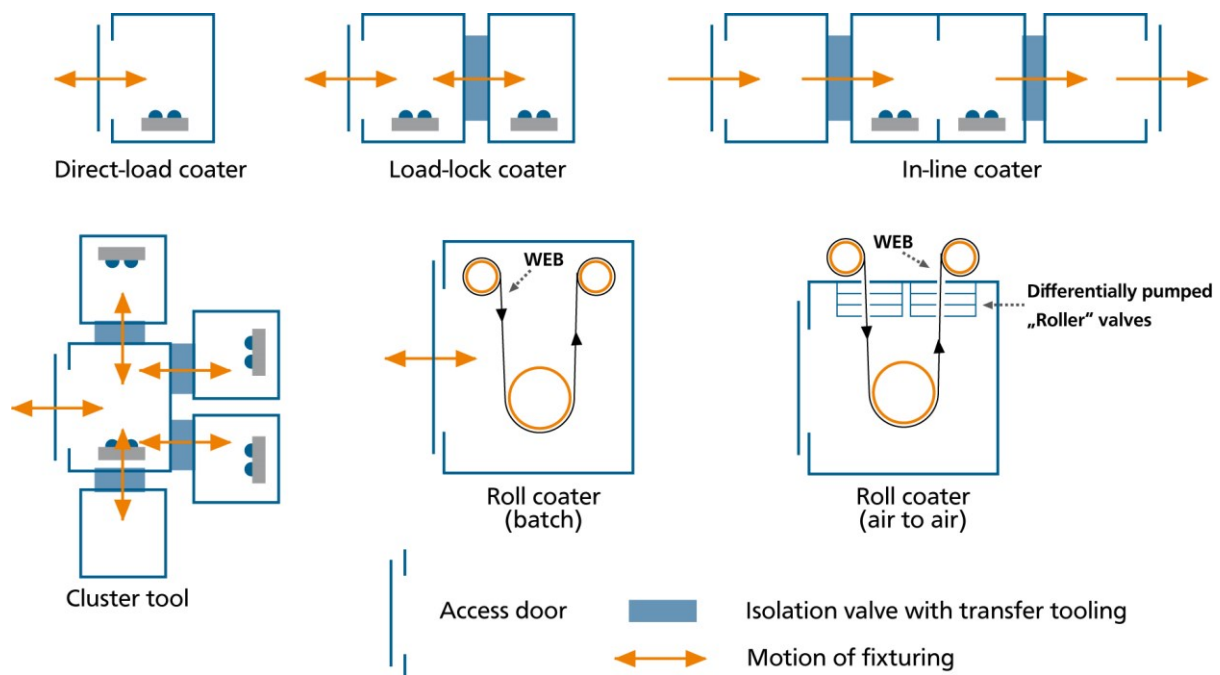


Abb. 2.20: Konfigurationsmöglichkeiten für Vakuumkammern
Quelle: In Anlehnung an Mattox (2010)

Bei Bogensubstraten ist das zu evakuierende Volumen deutlich geringer. Abb. 2.21 zeigt die „CoFlex 600“, eine Roll-to-Roll Pilotbeschichtungs-Anlage für ITO auf Folie des Fraunhofer-FEP in Dresden. Diese Anlage hat mehrere Dual-Magnetron-Sputtersysteme, um Folie mit ITO zu beschichten.

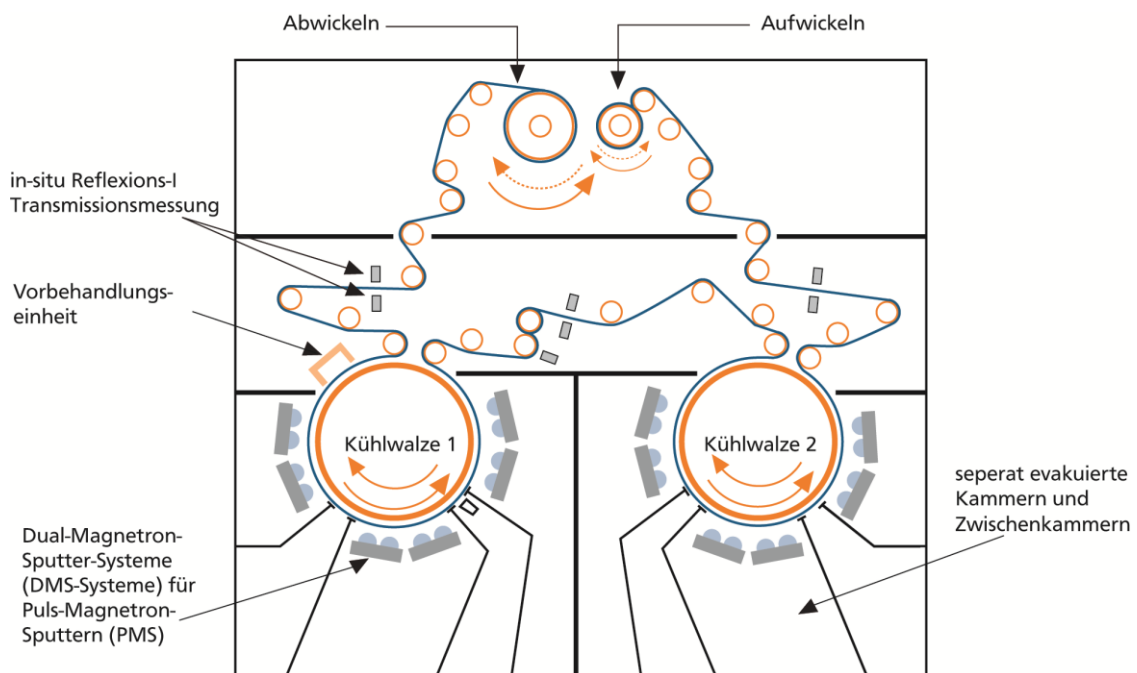


Abb. 2.21: CoFlex 600 - Roll-to-Roll Pilotbeschichtungs-Anlage für ITO auf Folie des Fraunhofer FEP Dresden
Quelle: In Anlehnung an Fahland (2009)

Die Abscheidegeschwindigkeit dieser Anlage von ITO liegt bei etwa 100 nm m/min . Bei einer Zielschichtdicke von 100 bis 200 nm und dem Einsatz mehrerer Dual-Magnetron-Sputtersysteme, können Geschwindigkeiten von mehreren Metern pro Minute erreicht werden.²³² Neuere Entwicklungen zeigen Aufdampfanlagen, in die nicht nur Rollensubstrate, sondern auch mehrere Bearbeitungsstationen integriert werden können. Somit ist mit einer solchen Anlage, wie sie in Abb. 2.22 dargestellt ist, auch ein kontinuierlicher Prozess über mehrere Bearbeitungsstationen möglich.

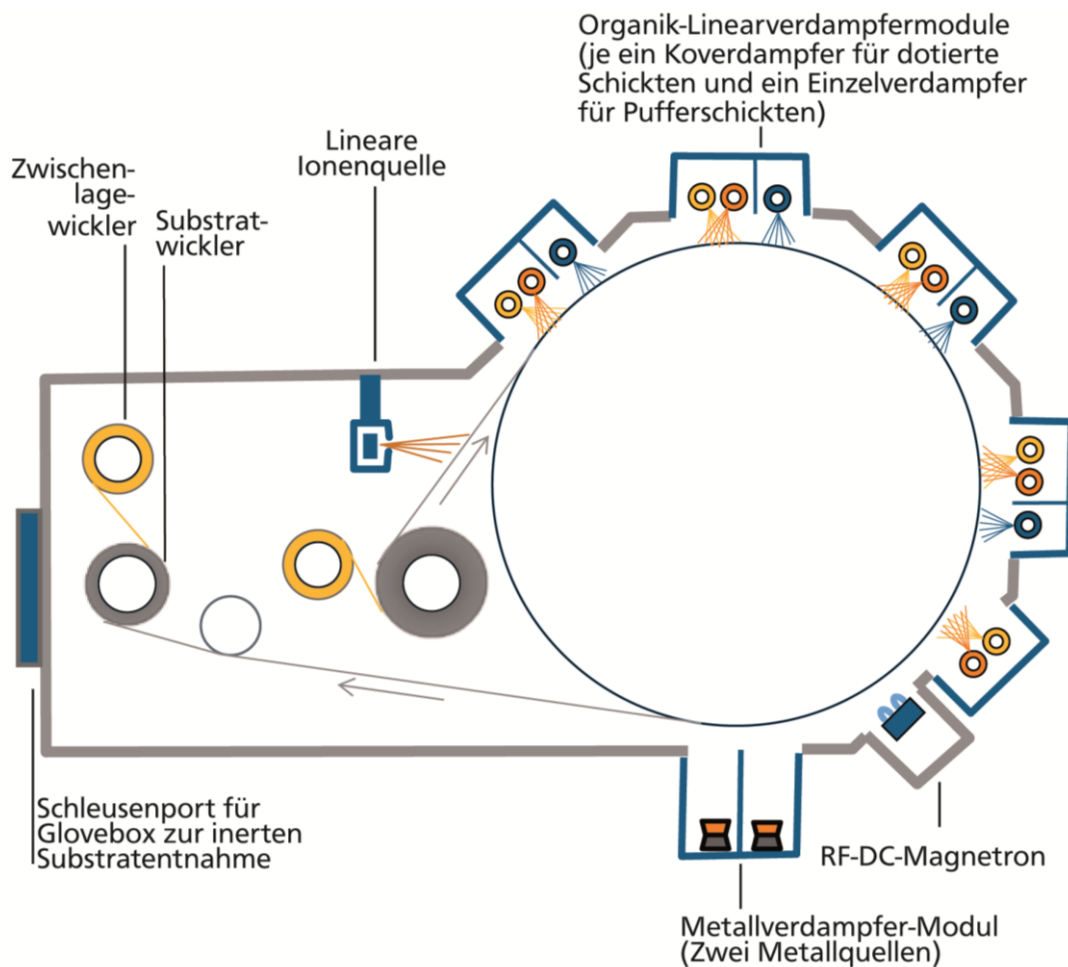


Abb. 2.22: Aufdampfanlage, die im Roll-to-Roll-Prozess mehrere Schichten innerhalb einer Anlage aufträgt.
Quelle: In Anlehnung an Leo (2011b)

Diese Aufdampfanlage hat die Möglichkeit über mehrere Quellen organische Materialien und somit mehrere Schichten eines Devices in einem Durchgang aufzubringen.²³³ Die Abscheiderate von Aufdampfanlagen für organische kleine

²³² vgl. Fahland (2009).

²³³ vgl. Leo (2011a). Leo (2011b).

Moleküle liegt bei einer Forschungsanlage bei etwa 1 -100 Å/min.²³⁴ Je nach Material und Produktionsanlage sind auch Abscheideraten von einigen hundert Å/min denkbar. Diese Raten sind nicht einfach mit mehr zugeführter Energie zu erhöhen, da sich dann auch die Schichten deutlich verändern. Die Morphologie der Schicht verschlechtert sich ab einer für das Material charakteristischen Abscheiderate. Die Moleküle brauchen Zeit, um sich auf dem Substrat anzuordnen.

Abb. 2.23 zeigt das Schema eines möglichen Aufbaus einer Roll-to-Roll-Vakuum-Anlage von organischen bulk-heterojunction Solarzellen. Die Schichten werden durch thermische Abscheidung von kleinen Molekülen im Hochvakuum erzeugt. Das transparente Foliensubstrat wird mit einer transparenten Grundlektrode beschichtet und in einem extra Prozessschritt mit Laser lateral strukturiert. Dieser Laser-Strukturierungsschritt findet nicht im Vakuum statt. Danach läuft das Substrat ins Hochvakuum wo hintereinander Lochtransportschicht, Absorbermischschicht, Elektronentransportschicht und zum Schluss der Deckkontakt per Aufdampfverfahren aufgebracht werden. Daraufhin wird der Deckkontakt in einem extra Prozessschritt mit einem Laser strukturiert. Abschließend wird das Device mit einem Sputterprozess verkapselt.²³⁵

Die Darstellungen zeigen, dass auch im Bereich der Aufdampfverfahren durch neue Entwicklungen deutliche Produktivitätssteigerungen möglich sind. Die Vorteile dieser Technologie sind vor allem die gute Schichtqualität und die gut zu kontrollierende Schichtdicke. Darüber hinaus konnte in der Elektronik- und Displaybranche bereits viel Erfahrung mit diesen Verfahren erworben werden. Nachteile sind vor allem die energieintensive und zeitraubende Vakuumherzeugung sowie die im Vergleich zum Drucken sehr langsame Abscheiderate.

²³⁴ vgl. McGeehee (2012).

²³⁵ vgl. Müller-Meskamp u. a. (2012).

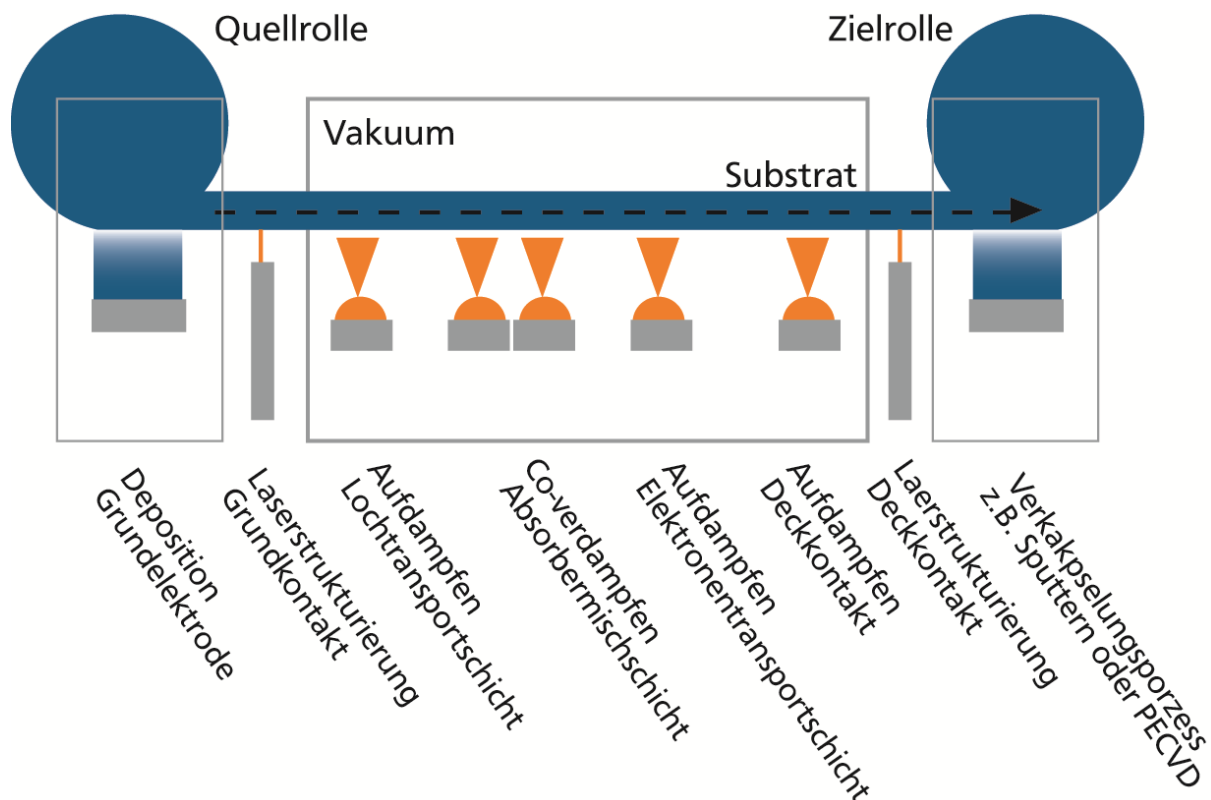


Abb. 2.23: Schemazeichnung eines möglichen Aufbaus einer Roll-to-Roll-Vakuumanlage zum Herstellen von organischen Solarzellen

Quelle: In Anlehnung an Müller-Meskamp u. a. (2012)

2.2.2. Charakteristiken von funktionalen Schichten

Funktionale Schichten bilden die Grundlage aller Devices der druckbaren Elektronik. Mit den hier vorgestellten Fertigungsverfahren werden zunächst Schichten und keine Devices erzeugt. Durch das Zusammenwirken der Schichten entsteht eine Funktion. Somit können mit den Fertigungsverfahren zunächst nur die Qualität der Schichten beeinflusst werden, und nur indirekt die Qualität der Devices. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt funktionale Schichten mit den wichtigsten Charakteristiken beschrieben. Die Bestimmung der Qualität einer gedruckten funktionalen Schicht unterscheidet sich deutlich von der des grafischen Druckens. Während die Schicht des grafischen Druckprodukts in erster Linie visuellen Anforderungen²³⁶ genügen muss, werden an die funktionalen Schichten deutlich mehr und höhere Anforderungen gestellt. Die Qualität dieses visuellen Eindrucks bei graphischen Produkten wird unter ande-

²³⁶ Neben der wichtigsten Anforderung „visuelle Qualität“ können bei bestimmten Druckprodukten noch andere Anforderungen hinzukommen. Bei einer Verpackung zum Beispiel sind noch der Warenschutz, die Produktwerbung, die notwendige Information sowie eine konstant hohe Druckqualität wichtig. Vgl. Teschner (2010).

rem durch Merkmale wie Farbdichte, Flächendeckung, Farbabnahme, Passer, Rasterfrequenz, Rasterpunktgröße und Rasterelementgröße beschrieben.²³⁷ Diese Kenngrößen sind für die Beschreibung funktionaler Schichten nicht geeignet, da es beim funktionalen Drucken darum geht, defektfreie funktionale Schichten mit neuartigen funktionalen organischen und anorganischen Materialien zu drucken.²³⁸ Um diese Schichten aus Fertigungssicht zu überprüfen, werden die folgenden Größen näher betrachtet: Schichtdicke, Randschärfe, minimale Strukturgröße, Oberflächenrauigkeit, minimale Linienbreite, Register und Verunreinigung.

Schichtdicke

Für die Funktion bestimmter Devices wie zum Beispiel OLEDs, OPVs oder OFETs ist die Schichtdicke sehr relevant. So ergibt sich aus der Device-Struktur und dem Auftragsverfahren meist eine bestimmte Schichtdicke um bestimmte Kennwerte zu erreichen. So muss beispielsweise bei einem OFET die Isolationschicht fehlerfrei sein, damit der Transistor funktioniert und somit eine Mindestdicke aufweisen. Da die Isolationswirkung von der Schichtdicke abhängt, muss diese auf das Material genau abgestimmt werden. OLEDs benötigen zum Beispiel sehr dünne Schichten von wenigen 10nm für eine optimale Lichtausbeute. Die Schichtdicke ist von den eingesetzten Materialien und dem Device-Layout abhängig. So berichten Shinar und Shinar bei einer OLED basierend auf kleinen Molekülen von Schichtdicken von 2 bis 20 nm.²³⁹ Somit liegt die zu erzielende Schichtdicke weit unter den Schichtdicken im graphischen Druck²⁴⁰, wo meist Schichtdicken um 1µm zum Einsatz kommen. Leiterbahnen und leitenden Schichten wiederum sollten höhere Schichtdicken aufweisen, da diese die Leitfähigkeit stark beeinflusst. Je größer der Leiterquerschnitt ist, desto kleiner ist der Widerstand. Je länger der Leiter ist, desto größer ist der Widerstand. Neben den technischen Eigenschaften beeinflusst die Schichtdicke auch den Materialverbrauch und somit die Kosten für das Bauteil.

Randschärfe

Die Randschärfe einer Leiterbahn wird hier als Strecke zwischen größter und kleinster Wölbung einer gedruckten Kante definiert (s. Abb. 2.24) und wird je

²³⁷ vgl. Kipphan (2001); Teschner (2010).

²³⁸ vgl. Dilfer/Dörsam (2009).

²³⁹ vgl. Shinar/Shinar (2009).

²⁴⁰ Übliche Schichtdicken im Offsetdruck liegen bei etwa 0,7 – 1,1 µm. Vgl. Teschner (2010).

nach Auflösung in Mikrometer angegeben. Die Randschärfe spielt immer dann eine Rolle, wenn zwei Strukturen kurzschlussfrei sehr nah zusammen positioniert werden sollen. Die Randschärfe hängt zum einen von der Qualität der Druckformherstellung und zum anderen von den Fluidparametern ab. Dies ist vor allem bei Leiterstrukturen der Fall, wie sie zum Beispiel bei Schaltungen auf kleinem Raum vorkommen. Die Strukturen können umso näher zusammen positioniert werden, je exakter die Ränder gedruckt werden. So hängt auch die Leistung der organischen Transistoren (OFET) neben der Mobilität des Materials auch von der Kanallänge, also dem minimalen Abstand zwischen der Source- und der Drain-Elektrode, ab. Umso kleiner der Abstand von Source und Drain ist, desto leistungsfähiger wird der Transistor und somit auch eine mögliche Schaltung. Bei Ausfransungen einer Leiterbahn kommt es an diesen Stellen zu Überhöhungen des elektrischen Feldes, so dass Ladungen von einem Leiter zum anderen überspringen können. Der Transistor wäre zerstört. Bei starken Ausfransungen müsste folglich der Abstand der Strukturen erhöht werden.

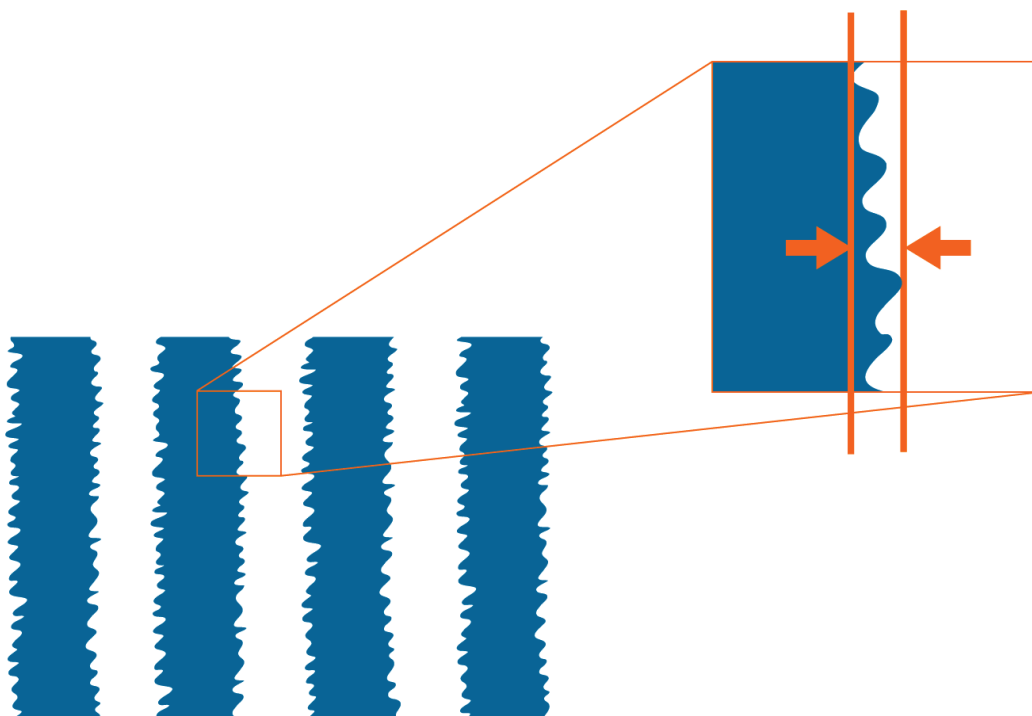


Abb. 2.24: Randschärfe einer gedruckten Leiterbahn

Minimale Strukturgröße

Die minimale Strukturgröße ist für die Bauteilintegration und für die Leistungsfähigkeit von Bauteilen wie dem OFET von großer Bedeutung. Um möglichst viel Funktion auf kleinem Raum unterzubringen, müssen die Transistoren und

die Leiter so klein wie möglich sein. Die minimale Strukturgröße hängt von der Auflösung der Fertigungsverfahren ab. Die Auflösung ist der „kleinste Abstand zweier benachbarter Details, die in der Wiedergabe gerade noch voneinander unterscheidbar sind.“²⁴¹ Die minimale Strukturauflösung ist bei den Verfahren sehr unterschiedlich.²⁴²

Oberflächenrauigkeit

Neben der Schichtdicke ist vor allem die Rauigkeit der Oberflächen der Funktionsschichten für die Leistungsfähigkeit der Bauteile von Bedeutung. Vor allem beim Drucken mehrerer Schichten übereinander ist die ein wichtiges Maß. So hängt die Güte der zweiten Schicht von der Oberflächenrauigkeit der ersten Schicht ab. Die Oberflächenrauigkeit, auch Schichthomogenität genannt, spielt auch bei leitenden Schichten eine Rolle. So steigt der Widerstand bei gegebener Spannung und Stromstärke an den dünneren Stellen an. Somit steigen an dünneren Stellen die Stromdichte und die thermische Belastung. Bei hohen thermischer Belastung kann dies zum Zerstören der Schicht an dieser Stelle und somit zum Bauteilversagen führen.

Minimale Linienbreite

Dieses Maß beschreibt die Linienbreite, die gerade noch druckbar ist, so dass die Linie keine Unterbrechung beinhaltet. Das Maß ist vor allem für Leiterbahnen wichtig, da diese so wenig wie möglich Platz einnehmen sollen. Diese werden heute vor allem im Siebdruck gedruckt, da hier bei kleinen Linienbreiten hohe Schichtdicken erreicht werden können.

Register

Allgemein beschreibt das Register²⁴³ die Genauigkeit der Positionierung der zu übertragenden Struktur bzw. Schicht auf dem Substrat²⁴⁴ und wird deshalb auch mit Positionsgenauigkeit umschrieben. Bei einzelnen Schichten beschreibt das Register die Abweichung der Schicht zur Sollposition auf dem Substrat. Hier ist eine Messung nur zu den Substratkanten möglich. Bei mehreren

²⁴¹ Teschner (2002).

²⁴² Vgl. Tabelle 4.2

²⁴³ Loh unterscheidet in seiner Arbeit zwischen Register und Passer. Beide Größen erfassen die gleiche Größe: die Lage von Druckbildern zueinander oder die Lage der Druckbilder zu den Kanten. Die Registermessung wird durchgeführt, damit der Maschinenbediener die Druckmaschine einstellen kann. Die Passermessung wird mit dem Ziel durchgeführt, eine Druckmaschine analytisch zu beurteilen. Die Passermessung kommt unter anderem zur Anwendung bei der Justage oder einer Endabnahme einer Druckmaschine. Vgl. Loh (2006).

²⁴⁴ vgl. Helbig/Bosse (1993).

Schichten ist mit Register die zweidimensionale Abweichung des auf das Substrat aufgetragenen Materials von der idealen Überlagerung gemeint. Eine Unterscheidung zwischen Anlage- und Übergaberegister scheint für das funktionale Drucken sinnvoll, obwohl das Maß bei beiden das Gleiche ist. Allerdings sind die Werte maschinenbedingt unterschiedlich. Das Anlageregister beschreibt die Abweichung zweier Schichten, die entweder auf zwei unterschiedlichen Maschinen oder auf einer Maschine nacheinander gedruckt wurden. Das Übergaberegister beschreibt die Abweichung, wenn die Schichten innerhalb eines Druckvorgangs in einer Maschine mit unterschiedlichen Druckwerken appliziert werden.

Das Register ist wichtig, wenn mehrere Schichten exakt übereinander positioniert werden müssen. Bei großflächigen Anwendungen wie OPV oder OLED-Beleuchtung sind die Anforderungen nicht so streng, da eine Abweichung von einigen zehn Mikrometern bei einer möglichst großen Devicefläche von mehreren zehn Quadratzentimeter zu vernachlässigen ist. Diese Anforderungen werden mit den heutigen Druckmaschinen schon erreicht.

Bei Anwendungen wie den OLED-Bildschirmen müssen die Schichten deutlich genauer zueinander positioniert werden. Neben der Backplane müssen auch die einzelnen leuchtenden Pixel exakt positioniert werden.²⁴⁵

Bei kleinen Strukturen wie den OFETs sind die Anforderungen an das Register sehr hoch, da hier die Schichten sehr exakt zu einander positioniert werden müssen. Die Gate-Elektrode sollte exakt zwischen den Source- und Gate-Kontakten gedruckt werden, um die Überlappkapazität so klein wie möglich zu halten.

Verunreinigung

Verunreinigungen verringern die Leistungsfähigkeit von gedruckten Devices/Bauteilen und können auch zum Ausfall führen. Die Verunreinigung eines Bauteils kann durch Staub, Materialresten oder durch die Umgebungsluft geschehen:

Unter **Staub** versteht man alle festen Teile in der Luft. Teilchen mit einem Durchmesser kleiner als $10\mu\text{m}$ werden als Feinstaub bezeichnet.²⁴⁶ Staubkörner stellen eine Fehlerquelle dar. So genannte Pinholes stellen durch Partikel verursachte kleine Defekte in Schichten dar.²⁴⁷ So können beispielsweise durch Pin-

²⁴⁵ vgl. Crawford (2005).

²⁴⁶ vgl. Gail/Gommel/Hortig (2012).

²⁴⁷ vgl. El-Kareh/Ghatalia/Satya (1995).

holes verursachte Löcher in Verkapselungsschichten die Wirksamkeit dieser Schicht zerstören, da durch diese Löcher Sauerstoff und Feuchtigkeit in die anderen Schichten eindringen kann und so zu einem Bauteilversagen führen wird.²⁴⁸ Abhilfe können zum einen deutlich dickere Schichten schaffen, oder eine staubarme Umgebung durch einen Reinraum.

Materialreste von einem älteren Druckvorgang können die Funktion der zu druckenden Schicht und somit die Leistung eines Bauteils beeinträchtigen. Um dies zu verhindern müssen alle Teile, die mit dem Fluid in Kontakt waren, gereinigt werden.

Es können allerdings auch **Materialreste** aus der Druckform oder aus anderen mit dem Fluid in Kontakt stehenden Bauteilen der Druckmaschine herausgelöst werden. So kommt es beispielsweise beim Flexodruck vor, dass die zum Teil aggressiven Lösemittel die Druckform, das Klischee, beschädigen. Dieses abgelöste Material der Druckform gelangt in das Fluid und später auch in die funktionalen Schicht, deren Funktion dadurch beeinträchtigt werden kann. Die Rasterwalze ist deutlich beständiger gegen die eingesetzten Lösemittel, da deren Oberfläche meist aus Chrom oder Keramik besteht. Um das Herauslösen von Material aus der Druckform zu verhindern, werden neue Materialien für den Einsatz für Flexodruckformen erforscht, um deren Widerstandsfähigkeit gegenüber den eingesetzten Lösemittel zu verbessern.

²⁴⁸ vgl. van de Weijer/van Mol (2009); van Assche u. a. (2008).; vgl. Shinar/Shinar (2009).

2.3. Überblick der wirtschaftlichen Grundzüge

In diesem Abschnitt werden die wirtschaftlichen Grundlagen für diese Arbeit erarbeitet. In Kapitel 2.3.1 werden Grundlagen der Produktion dargestellt, während in Kapitel 2.3.2 die notwendigen Produktionskennzahlen erläutert werden. In Kapitel 2.3.3 werden Grundlagen der Wirtschaftlichkeit und der Beurteilung von Investitionsalternativen beschrieben.

2.3.1. Grundlagen der Produktion

Allgemein können Unternehmen als soziale und technische Systeme beschrieben werden, „deren zentrale Aufgabe darin besteht, Werte in Form von Produkten zu erzeugen.“²⁴⁹ Unternehmen betreiben also Wertschöpfung. Das langfristige Ziel eines Unternehmens ist es, Erträge zu erwirtschaften, was sich kurz mit „To make money“²⁵⁰ umschreiben lässt. Zu diesem Zwecke müssen Unternehmen Wertschöpfung auf den unterschiedlichsten Stufen des Herstellungsprozesses betreiben.

Nach Porters prozessualen Ansatz der Wertkette ist ein Unternehmen die Summe aller wertschöpfenden Aktivitäten. Auch wenn in erster Linie die Wertschöpfung in der Produktion stattfindet, tragen alle Teile dazu bei, für das Unternehmen auf dem Markt Wettbewerbsvorteile zu generieren. Nur in dem effizienten Zusammenspiel aller Aktivitäten im Unternehmen können Unternehmen erfolgreich sein. Wie in Abb. 2.25 dargestellt, unterscheidet Porter zunächst primäre und unterstützende Aktivitäten. Die primären Aktivitäten tragen unmittelbar zur Wertschöpfung bei. Hierzu zählen die Produktion von Gütern und die anschließende Vermarktung. Die Logistik hat eine wichtige wertschöpfende Funktion, da Qualität auch über die Verfügbarkeit der Produkte zur richtigen Zeit am richtigen Ort definiert.²⁵¹

Ebenso hat die Logistik innerhalb der Produktion wichtige Aufgaben. Nur durch die exakte und richtige getimte Bereitstellung der Produktionsfaktoren kann die Produktion Wert schöpfen. Die unterstützenden Aktivitäten helfen den primären Aktivitäten Wertschöpfung zu generieren. Dazu zählen nach Porter Beschaffung, Forschung & Entwicklung sowie Personalmanagement, da diese aus

²⁴⁹ Westkämper (2006).

²⁵⁰ Günther/Tempelmeier (2012a).

²⁵¹ vgl. Porter (1990).

Marktsicht keinen Wert schafft. Aus der Sicht von Unternehmen dienen diese Aktivitäten zum Aufbau von Ressourcen und zur Erhöhung der Versorgungssicherheit.

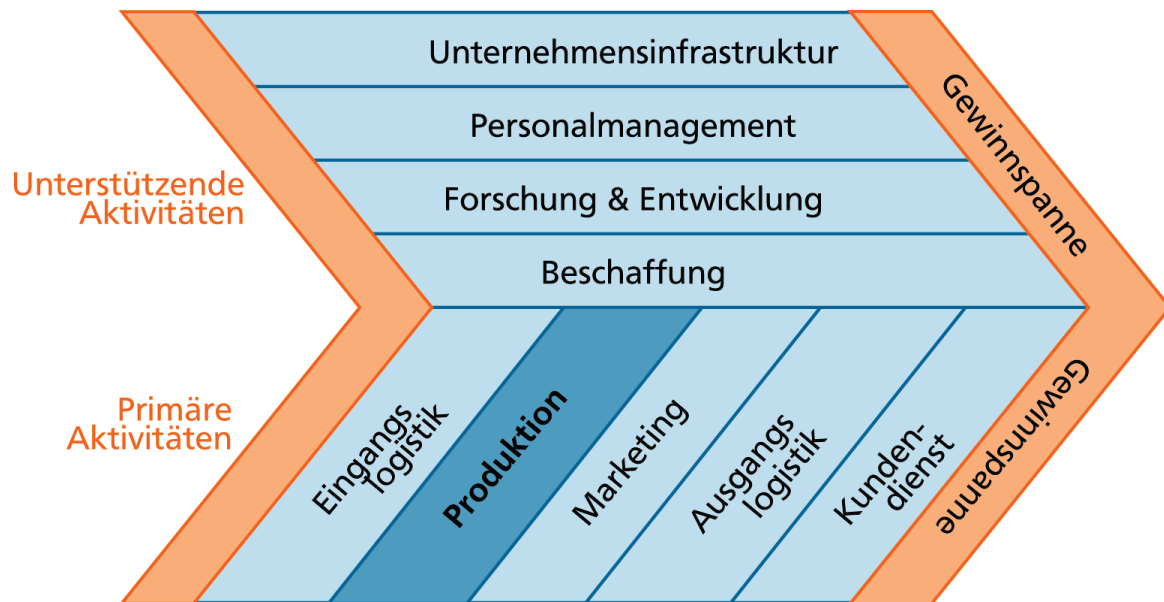


Abb. 2.25: Wertschöpfungskette nach Porter mit Hervorhebung der Produktion
Quelle: In Anlehnung an Porter (1990)

Die Produktion stellt dabei den Kern des Wertschöpfungsprozesses dar. Im Produktionsprozess werden Produktionsfaktoren kombiniert und transformiert, um daraus neue Produkte zu erstellen. Wie in Abb. 2.26 dargestellt, wird der Transformationsprozess als Produktionsprozess bezeichnet. Die für den Prozess notwendigen Produktionsfaktoren werden auch Input bezeichnet. Der Output des Produktionsprozesses sind die hergestellten Produkte.²⁵²

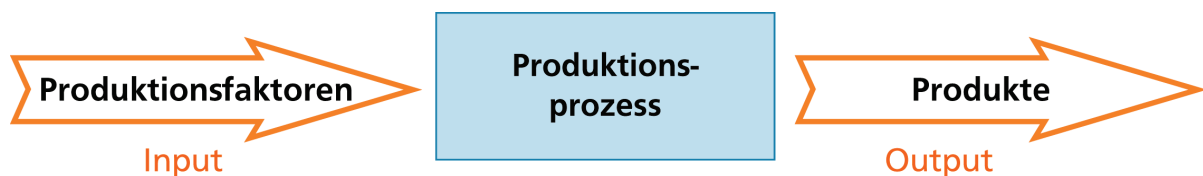


Abb. 2.26: Produktion als Teil des Betriebes
Quelle: In Anlehnung an Domschke/Scholl (2005)

Bei den Produktionsfaktoren erfolgt eine Differenzierung in Werkstoffe, Betriebsmittel und Arbeitskraft. Als Output können Produkte und Dienstleistungen unterschieden werden. Aus ökonomischer Sicht wird der Produktionspro-

²⁵² Domschke/Scholl (2005).

zess durch die Produktionstheorie und durch die Produktionsplanung untersucht. Die Produktionstheorie stellt die funktionalen Zusammenhänge zwischen der Menge der eingesetzten Produktionsfaktoren und der Menge der hergestellten Produkte in Form von Produktionsfunktionen dar. Eine Produktionsfunktion gibt für jede technisch mögliche Inputkombination die erzielbare Outputkombination an.²⁵³ Die Produktionstheorie bildet somit die Grundlage für die Produktionsplanung. Sie betrachtet die Organisation, die Koordination und die Steuerung des zeitlichen Ablaufs des Produktionsprozesses und umfasst alle zur Durchführung der Produktion erforderlichen Entscheidungen. Dabei wird zwischen strategischer (langfristiger) und operativer (kurzfristiger) Planung unterschieden. Um Wertschöpfung zu erzielen, müssen die folgenden allgemeinen Anforderungen erfüllt werden: Variabilität, Qualität, Zeit und Wirtschaftlichkeit.²⁵⁴ In der Literatur werden als Synonyme zu dem Produktionsprozess „die Begriffe Produktion, Fertigung oder Throughput verwendet.“²⁵⁵ Auch in dem allgemeinen Sprachgebrauch existiert keine eindeutige Unterscheidung. Dabei lassen sich die Begriffe wie folgt abgrenzen:

Produktion: Technische und organisatorische Prozesse zur Herstellung, zum Erhalt und zum Recycling von materiellen und immateriellen Produkten und deren Betreuung im gesamten Produkt-Lebenslauf.²⁵⁶

Fertigung: Herstellung materieller Güter unter Einsatz der Ressourcen Material, Energie, Maschinen, Menschen, Kapital, Information und Wissen. Die Fertigung ist lediglich ein Teilprozess der Produktion.²⁵⁷

Diesen Definitionen folgend, müssten in dieser Arbeit in unterschiedlichen Kontexten zwischen Produktion und Fertigung unterschieden werden. Im Sinne des allgemein üblichen Sprachgebrauchs und der somit besseren Verständlichkeit wird in dieser Arbeit einheitlich der Begriff Produktion verwendet. Zur Unterscheidung von Produktionsprozessen können diese nach den folgenden Kriterien klassifiziert werden: Eigenschaften der Produkte, Eigenschaften des Produktionsprogramms, Beziehung der Produktion zum Absatzmarkt, prozesstech-

²⁵³ vgl. Domschke/Scholl (2005).

²⁵⁴ Günther/Tempelmeier (2012a).

²⁵⁵ Acker (2011).

²⁵⁶ vgl. Westkämper (2006).

²⁵⁷ vgl. Westkämper (2006).

nische Anordnung.²⁵⁸ Im folgenden Abschnitte werden die Unterscheidungen nach Eigenschaften des Produktionsprogramms und nach der prozesstechnischen Anordnung beschrieben.²⁵⁹

Unterscheidungen nach Eigenschaften des Produktionsprogramms (Fertigungsart)

Die Fertigungsart kennzeichnet die Häufigkeit der Leistungswiederholung in der Produktion. Unterschieden werden hierfür Einzelfertigung, Serienfertigung, Variantenfertigung und Massenfertigung.

Bei der *Einmalfertigung* wird jedes Produkt einmalig und somit individuell hergestellt. Dabei wird auch von Sonder- oder Maanfertigungen gesprochen.

Bei der *Variantenfertigung* werden nacheinander diverse Varianten gleicher Produkte hergestellt. Im Unterschied zur Serienfertigung unterscheiden sich die Produkte hinsichtlich des Prozesses und der Materialien nicht, sondern nur in Form, Größe, Farbe etc.

Bei der *Serienfertigung* wird eine begrenzte Stückzahl ähnlicher Produkte hergestellt. Häufig werden für die Produktion die gleichen Produktionsanlagen genutzt, so dass diese für neue Produkte umgerüstet werden müssen. Bei der Serienfertigung kann zwischen Klein-, Mittel- und Großserienfertigung unterschieden werden.

Bei der *Massenfertigung* werden größerer Mengen gleicher Produkte hergestellt. Da diese großen Mengen nicht vorbestellt wurden, werden diese Produkte für einen „anonymen Markt“ hergestellt und werden zunächst gelagert. Bei der Massenfertigung bestehen aufgrund der Automatisierung des Produktionsprozesses große Rationalisierungsmöglichkeiten, so dass durch die große Stückzahl niedrige Stückkosten erzielt werden können.²⁶⁰

Unterscheidungen nach der prozesstechnischen Anordnung (Fertigungsprinzipien)

Das Fertigungsprinzip ist die räumliche Anordnung der Arbeitsplätze bzw. Betriebsmittel. Betriebsmittel können beispielsweise nach artgleichen Verrichtungen (beispielsweise Fräsen, Bohren, Drehen) oder nach produktspezifischen Prozessfolgen angeordnet werden. Somit kann bei einem während der Bearbei-

²⁵⁸ vgl. Günther/Tempelmeier (2012a).

²⁵⁹ Produktionsprozessen können des Weiteren auch nach den folgenden Attributen unterschieden werden: Menge, Auftrag, Absatz, Organisation und Produktionsstrukturtyp.

²⁶⁰ vgl. Westkämper (2006).

tung nicht ortsfesten Werkstück folgende Fertigungsprinzipien unterschieden werden:²⁶¹

- 1) Baustellenfertigung
- 2) Werkstättenprinzip
- 3) Fertigungszellen
- 4) Flexible Systeme
- 5) Fließprinzip (mit & ohne Takt)

Bei der *Baustellenfertigung* wird das Produkt während der Herstellung nicht bewegt (lokale Montage). Alle benötigten Ressourcen werden zu der Baustelle gebracht, um dort verarbeitet zu werden.

Das *Werkstättenprinzip* ist durch technologisch orientierte Bereiche gekennzeichnet. In den Werkstätten werden die Maschinen und Arbeitsplätze nach einer sinnvollen Nutzung der räumlichen Gegebenheiten angeordnet.

In *Fertigungszellen* werden mehrere Maschinen zu einer Zelle zusammengefasst, um so eine bessere Arbeitsteilung zu erreichen. Somit können beispielsweise Werkstückgruppen vollständig in einer Fertigungszelle gefertigt werden.²⁶²

Flexible Fertigungssysteme sind Mehrmaschinensysteme, welche meist mit Verkettungseinrichtungen mit einander verbunden sind. Somit wird ein automatischer Werkstückfluss ermöglicht, welcher häufig durch kleine Lager an den Stationen unterstützt wird. Flexible Fertigungssysteme sind leicht veränderbar um sie auf neue Produkte anzupassen. Sie arbeiten noch nicht nach dem Fließprinzip.

Das *Fließprinzip* ist durch bewegte Produkte gekennzeichnet, Produkte können dabei ohne feste Taktzeit oder im Zeittakt bewegt werden. Bei der Fließfertigung werden die Betriebsmittel nach dem Produktionsablauf aufgestellt. Die Bearbeitungsstationen werden so angeordnet, wie es die technologische Abfolge der Arbeitsgänge für die Produktion erfordert.²⁶³

Fertigungsprinzipien können grundsätzlich frei mit den Fertigungsarten kombiniert werden. Allerdings haben sich bestimmte Vorzugskombinationen

²⁶¹ vgl. Westkämper (2006).

²⁶² vgl. Günther/Tempelmeier (2012a); Westkämper (2006).

²⁶³ Die Fließbandfertigung ist eine Sonderform der Fließfertigung. Bei der Fließfertigung erfolgt die Förderung losweise, während bei der Fließbandfertigung die Förderung kontinuierlich verläuft. In beiden Fertigungsprinzipien sind die Arbeitsgänge zwar zeitlich vorbestimmt, aber bei Fließbandfertigung müssen die Arbeitsgänge auf Grund der bestehenden festen Verkettungen in einem definierten „Takt“ durchgeführt werden. vgl. Günther/Tempelmeier (2012a); Westkämper (2006).

herausgestellt, die offensichtlich gut zusammen passen. Die gängigen Kombinationen sind in Abb. 2.27 dargestellt.

Fertigungsarten	Fertigungsprinzipien					
	Baustellenfertigung	Werkstättenprinzip	Fertigungszellen	Flexible Systeme	Fließprinzip ohne Takt	Fließprinzip getaktet
Einmalfertigung	■	■				
Wiederholfertigung	■	■	■			
Variantenfertigung		■	■	■		
Serienfertigung				■	■	■
Massenfertigung					■	■

Abb. 2.27: Möglichkeiten der Kombination von Fertigungsarten und Fertigungsprinzipien
Quelle: In Anlehnung an Westkämper (2006)

„Der Fertigungstyp richtet sich im Allgemeinen nach dem herzustellenden Produktionsprogramm und der Art der Leistungswiederholung. Je nachdem, ob eine breite Palette verschiedener Produkte oder nur einige wenige Typen gefertigt werden, ob man sich an einem speziellen Auftrag orientiert oder in großen Mengen erzeugt, ergeben sich Fertigungsarten, die für eine Unternehmung vorteilhaft sind. Die Abgrenzung der Fertigungsarten sollte nicht nur unter Zugrundelegung der gefertigten Stückzahlen vorgenommen werden, es sind vielmehr noch eine Vielzahl anderer Kennzeichen, wie z.B. Auftragsfertigung, losweise Fertigung maßgebend.“²⁶⁴

Der Druckprozess lässt sich wie folgt einordnen

Bei den heutigen modernen Druckmaschinen, unabhängig ob das Substrat als Bogen oder Rollenmaterial vorliegt, handelt es sich immer um ein getaktetes Fließprinzip, bei dem, abhängig von der Druckgeschwindigkeit, der nächste Teilprozess in einem festen Takt durchgeführt wird. Bezüglich der Fertigungsart kann der Druckprozess in mehrere Kategorien einsortiert werden. Rein von

²⁶⁴ Westkämper (2006).

der Outputmenge handelt es sich um eine Massenfertigung. Allerdings stellen die wenigsten Druckmaschinen immer exakt das gleiche Produkt her, so dass die Maschinen regelmäßig gerüstet werden. Folglich kann der Druckprozess auch als Variantenfertigung bzw. als Variantenfließfertigung²⁶⁵ bezeichnet werden. Beim Digitaldruck können bei voller Geschwindigkeit Maßanfertigung für jedes Produkt hergestellt werden, so dass dieser Prozess schwer in diese Kategorien einzuordnen ist.

Fabrik

„Mit Fabrik bezeichnet man gemeinhin eine gewerbliche Betriebs- oder Produktionsstätte zur – im Unterschied zur Manufaktur – maschinellen sowie arbeitsteiligen Herstellung von Produkten.“²⁶⁶ In der VDI-Richtlinie 5200 zur Fabrikplanung ist Fabrik wie folgt definiert: „Fabrik bezeichnet den Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet.“²⁶⁷ Eine Fabrik lässt sich mit den fünf Charakteristiken Standort, Werkstruktur, Fabrikgebäude mit Fabrikstruktur und Fabriklayout, Produktionslogistik sowie Arbeitsorganisation beschreiben.

Fabrikplanung

„Aufgabe der Fabrikplanung ist es, unter Berücksichtigung zahlreicher, spezifischer Randbedingungen die Voraussetzungen zur Erfüllung der betrieblichen Ziele sowie der sozialen und volkswirtschaftlichen Funktionen einer Fabrik zu schaffen. Die Planung der Fabrikstruktur und damit die Anordnung der Funktionseinheiten erfolgt unter produktionstechnischen, logistischen und organisatorischen Gegebenheiten.“²⁶⁸ Die wichtigsten und strukturbestimmenden Funktionseinheiten sind vor allem die Produktion und die Logistik. Diese orientieren sich an den zu fertigenden Produkten und den hierzu erforderlichen Fertigungsverfahren. Die zuvor definierten Begriffe Fertigungsarten und Fertigungsprinzipien spielen folglich bei der Fabrikplanung eine zentrale Rolle. Weitere Funktionseinheiten sind neben der Produktion und der Logistik Hilfsbereiche wie Fertigungsmittelbau, Instandhaltung und Versorgung sowie Verwaltungs- und Personalbereiche.²⁶⁹

²⁶⁵ Weitere Informationen zur Variantenfließfertigung in Boysen (2005).

²⁶⁶ Erlach (2010).

²⁶⁷ VDI Verlag (2009).

²⁶⁸ Pawellek (2008a).

²⁶⁹ vgl. Pawellek (2008a).

Produktionssystemplanung

Die Produktionssystemplanung ist ein Teil der Fabrikplanung, und wird immer dann angewendet, wenn eine neue Produktion aufgenommen werden soll.²⁷⁰ Da nicht für jedes Produktionssystem eine neue Fabrik geplant werden muss, kommt folglich die Produktionssystemplanung häufiger zum Einsatz. Der Fabrikbetrieb ist besonders durch die Organisation der Arbeitsabläufe in den Produktionsprozessen bestimmt. Von einem Produktionssystem spricht man, sobald die Arbeitsorganisation der Produktion strukturiert beschrieben ist:

„Ein **Produktionssystem** ist die Systematik, die die in einer Produktion zulässigen methodischen Standards sachlogisch aufeinander aufbaut. Ein Produktionssystem legt fest, wie zu produzieren ist.“²⁷¹

Ein Produktionssystem ist somit mehr, als ein flexibles Bearbeitungszentrum. Es bildet vielmehr einen arbeitsorganisatorischen Rahmen, der für alle Mitarbeiter handlungsleitend ist. Dazu zählen unter anderem die Formulierung von Gestaltungsrichtlinien, Formulierung von Handlungsanweisungen, Zuordnungen klarer Verantwortlichkeiten sowie ein Produktionscontrolling.²⁷² Ein bedeutender Teil der Produktionssystemplanung ist dabei die Anordnung der beteiligten Bearbeitungsstationen. Sobald ein neues Produkt produziert werden soll, müssen unter Berücksichtigung der Prozesskette die Bearbeitungsstationen angeordnet werden. Die Prozesskette gibt die Reihenfolge der Teilprozesse vor. Dabei wird das Produktionssystem von dem zu Grunde liegenden Fertigungsprinzip bestimmt. Auch die Fertigungsart spielt dabei eine wichtige Rolle. Für den Produktionsprozess müssen Werkstätten, Energie, Personal und Informationen bereitgestellt werden. Darüber hinaus sind Betriebsmittel sowie Mess-, Lager- und Transporteinrichtungen notwendig. In Abb. 2.28 sind die Elemente eines Produktionssystems und deren Verknüpfungen dargestellt. „Genereller Zweck des Produktionssystems ist die Herstellung der richtigen Produkte nach Art und Menge, zum richtigen Zeitpunkt, in einer spezifizierten Qualität und zu akzeptablen Kosten.“²⁷³

²⁷⁰ In der Fabrikplanung werden die Begriffe Layoutplanung, Fertigungsmittelanordnung, Produktionsprozessplanung und Anordnungsplanung ähnlich wie Produktionssystemplanung verwendet.

²⁷¹ Erlach (2010).

²⁷² vgl. Erlach (2010).

²⁷³ Westkämper (2006).

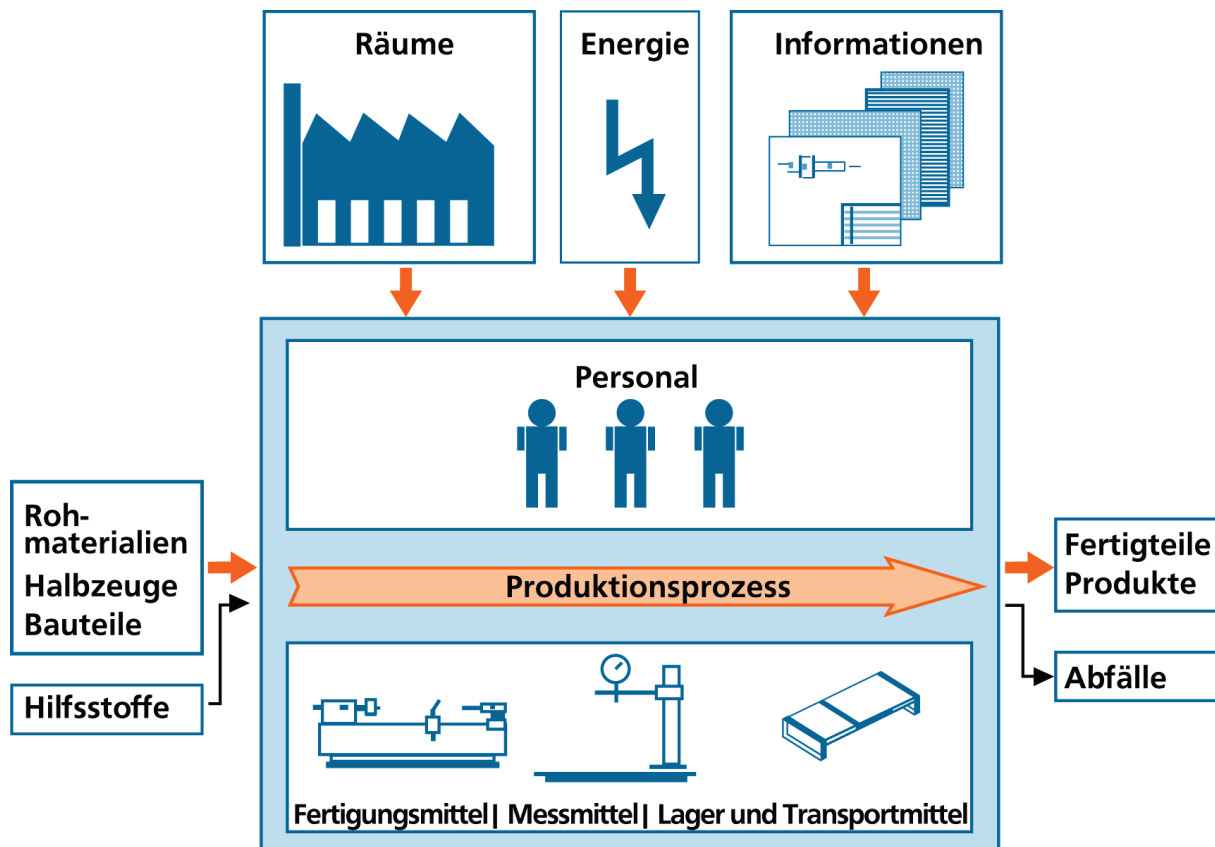


Abb. 2.28: Systematische Darstellung eines Produktionssystems
Quelle: Westkämper (2006)

Optimierung von Produktion

Wie bereits beschrieben, haben Unternehmen das langfristige Ziel, Gewinne zu erwirtschaften. Der Gewinn eines Unternehmens hängt unter anderem von der Leistungsfähigkeit und Qualität der Produkte sowie deren Preisen ab. Folglich stellt sich die Frage, inwieweit die Produktion hinsichtlich dieses Unternehmensziels optimiert werden kann. Aus Sicht der Produktion kann der Gewinn mit einem höheren Output oder durch Senkung der Kosten beeinflusst werden. Aber auch die Zeit, bis ein Produkt zum Kunden geliefert wird, kann von der Produktion und vor allem der Logistik beeinflusst werden. Diese drei Größen stellen das Dreieck aus Kosten, Qualität und Zeit dar.²⁷⁴ Als Zielsetzung für die Produktion lassen sich folglich niedrige Herstellkosten, hohe Produktqualitäten sowie kurze Durchlaufzeiten in Produktion und Auftragsabwicklung ableiten.²⁷⁵

²⁷⁴ vgl. Westkämper (2006).

²⁷⁵ vgl. Erlach (2010).

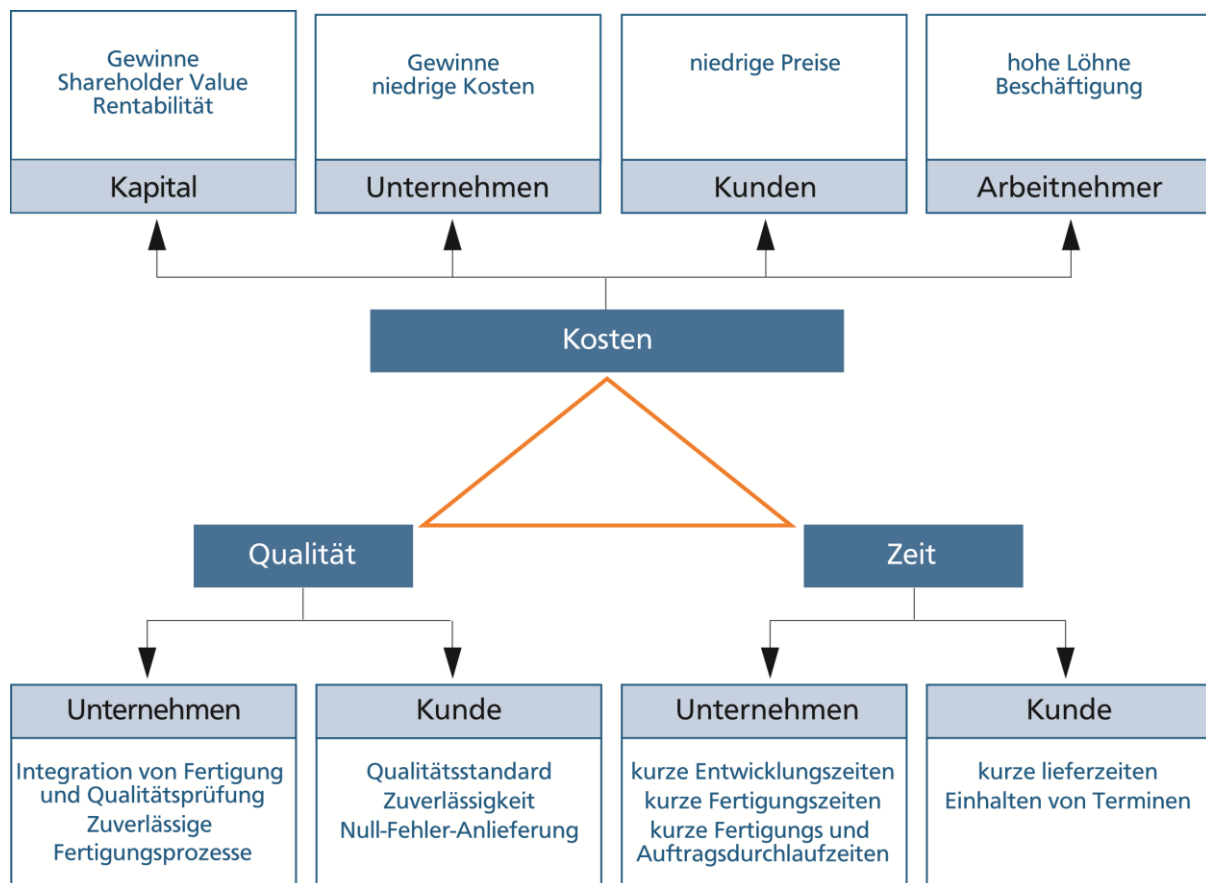


Abb. 2.29: Die drei entgegengesetzten Leistungsziele: Qualität, Zeit und Kosten
Quelle: In Anlehnung an Westkämper (2006)

Da die dynamischen Märkte immer kürzere Lieferzeiten fordern, ist die Produktion sehr stark unter Zeitdruck. Aus Sicht der Produktion gilt es somit vor allem die Durchlaufzeiten der Aufträge durch die Produktion sowie die Zeiten der Ausführung einzelner Vorgänge zu verkürzen. Mit einer Verkürzung der Zeiten sinken die Kosten, aber gleichzeitig kann die Qualität darunter leiden. Eine höhere Qualität verlangt tendenziell auch längeren Bearbeitungszeiten, was wiederum zu höheren Kosten führt.²⁷⁶ Erlach (2010) entwickelt vier Zieldimensionen der Produktion. Neben den drei genannten Wirtschaftlichkeit (Kosten), Qualität und Geschwindigkeit (Zeit), ergänzt Erlach die Variabilität. Heute hergestellte Produkte kommen mit vielen möglichen Varianten auf dem Markt um sich von der Konkurrenz abzugrenzen.²⁷⁷ Auch Günther und Tempelmeier gehen auf die gleichen Dimensionen ein.²⁷⁸ Die vier Zieldimensionen der Produktion sind in Abb. 2.30 dargestellt.

²⁷⁶ vgl. Westkämper (2006).

²⁷⁷ vgl. Erlach (2010)

²⁷⁸ vgl. Günther/Tempelmeier (2012a).

Effizienzsteigerung in den Zieldimensionen der Produktion

Variabilität	Qualität	Geschwindigkeit	Wirtschaftlichkeit
Variantenbreite Kundenspezifik Maschinenflexibilität Wandlungsfähigkeit Mitarbeiterqualifikation ⋮	Ausschuss & Nacharbeit Ergonomie Arbeitssicherheit Termintreue Eigenverantwortung ⋮	Bearbeitungszeit Rüstzeit Verfügbarkeit Produktions-Durchlaufzeit Krankenstand ⋮	Materialausnutzung Energie-/ Ökoeffizienz Maschinen-Auslastung Flächeneffizienz Mitarbeiter-Produktivität ⋮

Abb. 2.30: Die vier Zieldimensionen der Produktion
 Quelle: In Anlehnung an Erlach (2010)

Die *Variabilität* einer Produktion gibt an, wie viele unterschiedliche Produkte hergestellt werden können. Wie einfach ist es verschiedene Varianten bzw. kundenspezifisch gestaltete Produkte zu fertigen. Die Flexibilität einer Produktion bestimmt die Möglichkeit auf Nachfrageschwankungen die Outputmenge anzupassen. Die Wandlungsfähigkeit sagt etwas darüber aus, wie einfach eine Produktion auf geänderte Anforderungen angepasst werden kann. Die *Qualität* einer Produktion lässt sich zum einen über den Ausschuss bestimmen. Zum anderen sagt die Qualität einer Produktion auch etwas über die Zuverlässigkeit der Prozesse aus. Die *Geschwindigkeit* einer Produktion beschreibt die Durchlaufzeit. Also die Zeit, die ein Produkt für den Herstellprozess benötigt. Häufige Störungen wirken sich negativ auf die Effizienz einer Produktion aus. Die *Wirtschaftlichkeit* beschreibt die Produktivität einer Produktion. Anforderungen der anderen drei Ziele wirken sich dabei auf die Wirtschaftlichkeit aus. Die Leistungsfähigkeit einer Produktion ist durch diese vier voneinander unabhängigen Zieldimensionen grundsätzlich bestimmt. Die Realisierung dieser Ziele ist allerdings voneinander abhängig, so dass Konflikte entstehen. Erlach (2010) entwickelte daraus das logische Zielquadrat der Produktion mit den sechs Konfliktlinien. Abb. 2.31 zeigt, wie die vier Zieldimensionen einer Produktion in sechs unterschiedlichen Zielkonflikten zueinander stehen.

- 1) Qualität & Wirtschaftlichkeit: kontradiktorischer Zielwiderspruch
- 2) Variabilität & Geschwindigkeit: kontradiktorischer Zielwiderspruch
- 3) Variabilität & Qualität: konträrer Zielwiderspruch
- 4) Variabilität & Wirtschaftlichkeit: Zielunterordnung
- 5) Qualität & Geschwindigkeit: Zielunterordnung
- 6) Wirtschaftlichkeit & Geschwindigkeit: Zielverträglichkeit

„Die Verbesserung der einzelnen Ziele geht dabei nicht immer auf symmetrische Weise zu Lasten eines anderen Zieles; manche Ziele sind durchaus gleichzeitig verbesserbar.“²⁷⁹ Daraus folgt für die Produktionsoptimierung die Aufgabe, einen Produktionsbetrieb an einem Produktionsstandort hinsichtlich der vier Zieldimensionen so auszustatieren, dass der Nutzen maximiert wird.²⁸⁰

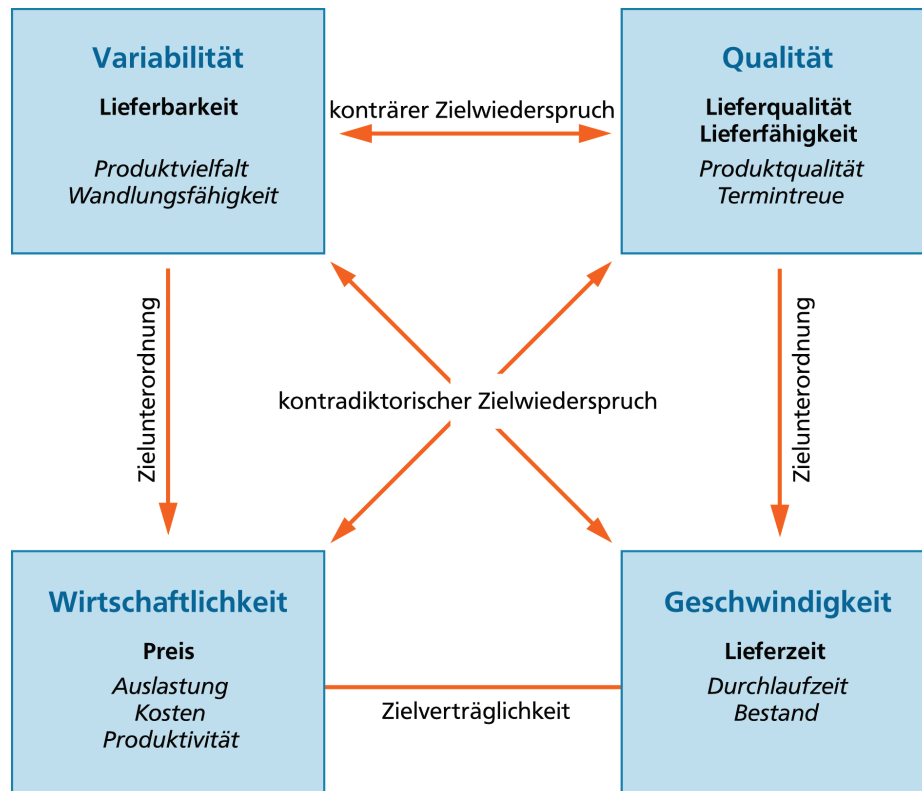


Abb. 2.31: Das logische Zielquadrat der Produktion mit den sechs Konfliktlinien
Quelle: In Anlehnung an Erlach (2010)

Erlach (2010) wendet diese vier Zieldimensionen der Produktion auf die herzustellenden Produkte an. Ein Unternehmen versucht für seine Produkte immer den maximalen Preis am Markt zu erzielen. Der Preis kann dabei durch Materialqualität, Verarbeitungsqualität, Haltbarkeit und Zuverlässigkeit, Design und Marken-Image, Verfügbarkeit, innovative Produktgestaltung, Folgekosten der Anwendung, Umweltverträglichkeit und anderes gerechtfertigt sein.²⁸¹ „Die analoge Struktur der Zieldimensionen der Produktion und der Erfolgsfaktoren der Produkte am Markt zeigt, dass beide aufeinander abgestimmt sein müs-

²⁷⁹ Erlach (2010)

²⁸⁰ vgl. Erlach (2010)

²⁸¹ vgl. Erlach (2010).

sen.“²⁸² Das Produktionssystem muss dabei auf die Produkte und den Markt angepasst werden (vgl. Abb. 2.32).²⁸³

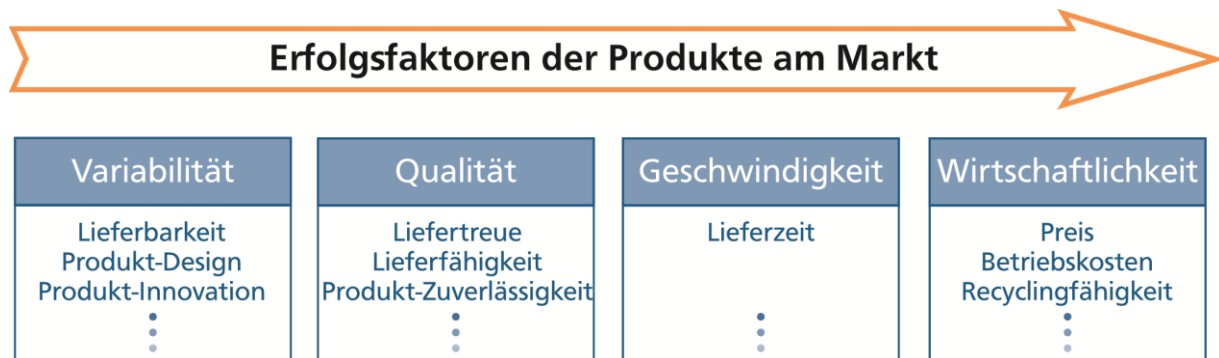


Abb. 2.32: Die vier Erfolgsfaktoren der Produkte am Markt
Quelle: In Anlehnung an Erlach (2010)

Produktionsplanung

Die Produktionsplanung besteht aus der Produktionsprogrammplanung (PPP) sowie aus der Produktionsplanung und -steuerung (PPS).

Produktionsprogrammplanung (PPP)

„Das aktuelle Produktionsprogramm legt auf Grundlage der Vorgaben aus der strategischen und taktischen (d.h. lang- und mittelfristigen) Produktionsplanung die in einem vorgegebenen Zeitraum tatsächlich herzustellenden Produkte nach Art, Menge und zeitlichem Rahmen fest. Dabei sind wiederum die übergeordneten Unternehmensziele zu berücksichtigen. Die Planung des aktuellen Produktionsprogramms ist eng mit der Beschaffungs- und Absatzplanung verknüpft. Dies bedeutet, dass das Produktionsprogramm unter Berücksichtigung der Absatzerwartungen des Unternehmens, der vorhandenen Produktionskapazitäten und der Beschaffungsmöglichkeiten zu planen ist.“²⁸⁴

*Produktionsplanung und -steuerung (PPS)*²⁸⁵

Aufgabe der Produktionsplanung ist die detaillierte Planung des Fertigungsprozesses und lässt sich in Produktionsprogramm-, Materialbedarfs- und der Produktionsprozessplanung einteilen. Das Ziel der Produktionsplanung besteht in

²⁸² Erlach (2010).

²⁸³ Weitere Optimierungsmöglichkeiten ergeben sich vor allem aus der lean-production. Diese geht zurück auf die von Womack/Jones/ Roos in deren MIT-Studie bei japanischen Automobilherstellern systematisierte Produktionsorganisation. Vgl. Womack/Jones/ Roos (1991). Weitere Informationen zu lean-production vgl. Brunner (2008).

²⁸⁴ Domschke/Scholl (2005).

²⁸⁵ Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) wird dabei von vielen Fachrichtungen bestimmt: Betriebswirtschaftslehre, Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen und insbesondere der Wirtschaftsinformatik.

der Minimierung der beeinflussbaren Produktionskosten. Dabei handelt es sich vor allem um Fertigungskosten, Leerkosten, Lagerhaltungskosten und Strafkosten aufgrund von Lieferunfähigkeit. Teilaufgaben der Produktionsplanung und –steuerung (PPS) sind die Durchlaufterminierung, Kapazitätsplanung, Maschinenbelegungsplanung sowie die Losgrößenplanung.²⁸⁶

2.3.2. Produktionskennzahlen

Zur Planung, Steuerung und Kontrolle des betrieblichen Geschehens benötigen Entscheidungsträger Informationen, um Entscheidungen treffen zu können. Aus der Fülle von Informationen aus der Unternehmung und im Besonderen aus der Produktion, gilt es die wichtigen Informationen zu filtern. Hierbei helfen Kennzahlen, indem sie in der Regel die zahlenreichen Einzeldaten aggregieren und zu überschaubaren sowie besser handhabbaren Kenngrößen zusammenfassen.²⁸⁷ „Kennzahlen sind definiert als quantitativen Größen, durch die bestimmte, zahlenmäßig erfassbare betriebswirtschaftliche Sachverhalte abgebildet werden.“²⁸⁸ Produktionskennzahlen sind ein wesentlicher Teil des Produktionscontrollings. Kennzahlen lassen allerdings nur einen innerbetrieblichen Vergleich zu, da diese nicht genormt sind und somit unterschiedlichen generiert und interpretiert werden. Im folgenden Abschnitt werden die für diese Arbeit relevanten Produktionskennzahlen in alphabetischer Reihenfolge erläutert und deren mathematische Zusammenhänge aufgezeigt.

Die **Bearbeitungszeit** ist die Zeitspanne, in der an dem herzustellenden Produkt Arbeitsvorgänge verrichtet werden.²⁸⁹

Die **Durchlaufzeit** ist die Zeitspanne von der Aufnahme eines Produkts in den Produktionsprozess bis zu seiner Abgabe.²⁹⁰ Dabei kann die Durchlaufzeit auf einzelne Bearbeitungsschritte oder auf einen kompletten Fertigungsauftrag bezogen werden. Die Durchlaufzeit eines Bearbeitungsschrittes wird vom Eingang der Maschine bis zu deren Ausgang gemessen. Die Durchlaufzeit eines Fertigungsauftrages wird vom Eingang der ersten Maschine bis zur letzten Maschine gemessen.

²⁸⁶ vgl. Domschke/Scholl (2005).

²⁸⁷ vgl. Dyckhoff/Spengler (2004); Steven (2006).

²⁸⁸ Steven (2006).

²⁸⁹ vgl. VDI Verlag (1998).

²⁹⁰ vgl. VDI Verlag (1998).

Der **Durchsatz** ist die Menge des herzustellenden Produktes, welche in einer definierten Zeitspanne eine bestimmte Stelle im Produktionssystem durchläuft.²⁹¹ Der Durchsatz kann auch als die Menge beschrieben werden, die während einer definierten Zeitspanne mit einem Produktionssystem produziert wird.²⁹² Diese Kennzahl hat die Einheit Stück pro Zeiteinheit und beschreibt den materiellen Durchsatz. Der zeitliche Durchsatz beschreibt die Zeit zwischen der Fertigstellung zweier Produkte. Der zeitliche Durchsatz hat somit die Einheit Zeit. Zur Bestimmung des Durchsatzes muss sich das System im stationären Zustand befinden.²⁹³ Eines der Hauptziele des Produktionsmanagement ist die Maximierung des Durchsatzes einer Fertigungsanlage.²⁹⁴

Kapitalbindung bezeichnet das im Unternehmen investierte und somit gebundene Kapital in Vermögensgegenstände. Dabei wird zwischen Anlage- und Umlaufvermögen unterschieden. Anlagevermögen sind beispielsweise Maschinen für die Produktion. Da das Kapital gebunden ist, entstehen Opportunitätskosten, da das Kapital nicht anders gewinnbringend angelegt werden kann.²⁹⁵ Umlaufvermögen ist vor allem das Material wie Rohstoff und Halbzeuge der herzustellenden Produkte. Abb. 2.33 zeigt die Kapitalbindung in einem Produktionsprozess. Bezüglich des Umlaufvermögens ist das Kapital vom Zeitpunkt der Zahlung an den Lieferanten bis zur Zahlung des Kunden gebunden.²⁹⁶

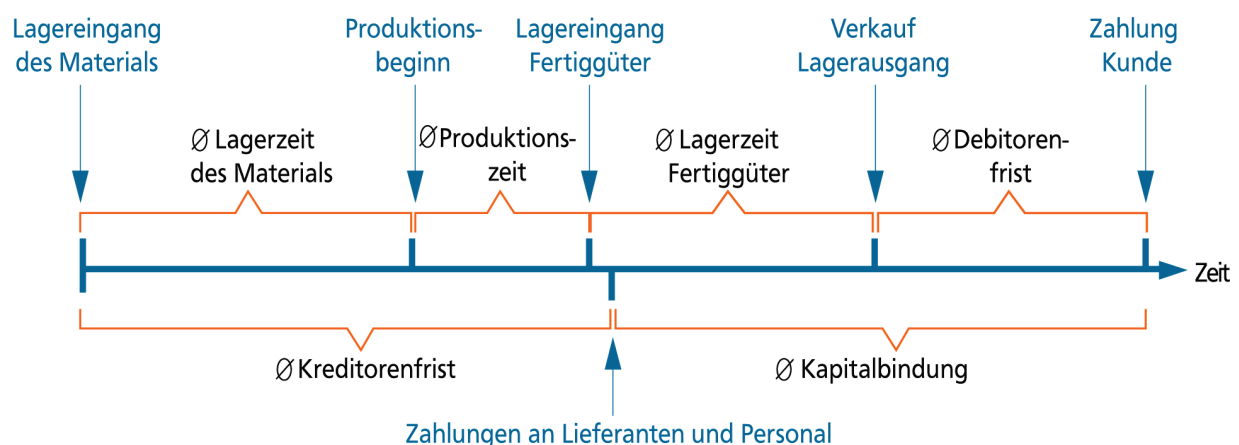


Abb. 2.33: Darstellung der Kapitalbindung im Produktionsprozess anhand eines Zeitstrahls
Quelle: In Anlehnung an Thommen (2012)

²⁹¹ vgl. VDI Verlag (1998).

²⁹² vgl. Helfrich (2002).

²⁹³ vgl. VDI Verlag (1998).

²⁹⁴ vgl. Corsten/Gössinger (2012).

²⁹⁵ vgl. Gabler Verlag (2010).

²⁹⁶ vgl. Thommen/Achleitner (2012).

Die **Leerlaufzeit** ist die Zeit, in der die verwendeten Maschinen während des Produktionsvorgangs ungenutzt bleiben. Werden die Leerlaufzeit mit dem fixen Kostensatz der Maschine multipliziert, können die Leerkosten der Maschine berechnet werden. Die Leerlaufzeit stellt hierbei eine Kennzahl zur Ermittlung der Unterbeschäftigung der Anlage dar.²⁹⁷

Während der **Liegezeit** wird das Produkt im Produktionsprozess nicht bearbeitet. Das Produkt wird entweder von zwischen zwei Bearbeitungsschritten transportiert oder in einem Puffer gelagert.

Der **Puffer** ist ein Lager zu Beginn des Produktionsprozesses oder zwischen zwei Bearbeitungsschritten, um Zwischenprodukte zwischenlagern zu können, bis diese weiter verarbeitet werden können.²⁹⁸

Die **Rüstzeit** ist die Zeit, die für das Umrüsten einer Produktionsanlage benötigt wird. Ein Umrüsten einer Produktionsanlage ist bei Verschleiß von Werkzeugen oder einem Sortenwechsel des Produktes notwendig.²⁹⁹ Bei Druckmaschinen spricht man auch von Rüsten, wenn eine Substratrolle bzw. -stapel in die Druckmaschine eingebracht wird.

Die **Taktzeit** beschreibt die Zeit zwischen dem jeweiligen Beginn aufeinanderfolgender Vorgänge.³⁰⁰

Der **Rüstzeitanteil** ist der prozentuale Anteil der Rüstzeit an der gesamten Durchlaufzeit. Diese Größe spielt bei der Losgrößenplanung eine wichtige Rolle. Ein kleiner Rüstzeitanteil ist von Vorteil.³⁰¹

2.3.3. Wirtschaftlichkeit

Zunächst werden in dem folgenden Abschnitt 2.3.3.1 einige grundlegende Begriffe der Betriebswirtschaft und der Wirtschaftlichkeit beschrieben. Im darauf folgenden Abschnitt 2.3.3.2 wird die Beurteilung von Investitionsalternativen beschrieben.

²⁹⁷ vgl. Bauer/Hayessen (2009).

²⁹⁸ vgl. Klaus/Krieger (2008); VDI Verlag (1998).

²⁹⁹ vgl. Klaus/Krieger (2008).

³⁰⁰ vgl. VDI Verlag (1998).

³⁰¹ vgl. VDI Verlag (2004).

2.3.3.1. Begriffsklärung

Die Wirtschaftlichkeit ist neben der Produktivität sowie Rentabilität und Gewinn eines von drei formalen Unternehmenszielen. Diese Formalziele können unter Berücksichtigung der Menschen inner- und außerhalb des Unternehmens in vier Bereiche von Sachzielen unterschieden werden: Leistungsziele, Finanzziele, Führungs- und Organisationsziele sowie soziale und ökologische Ziele.³⁰² Abbildung Abb. 2.34 zeigt eine Einteilung der Unternehmensziele.

Der Begriff Wirtschaftlichkeit steht für eine Tätigkeit, die dem ökonomischen Prinzip³⁰³ genügt und basiert auf dem Grundsatz nach dem optimalen Einsatz der Produktionsfaktoren.³⁰⁴ Das **Wirtschaftlichkeitsprinzip** beschreibt den „Grundsatz, dass ein bestimmter Erfolg mit dem geringst möglichen Mitteleinsatz (sog. Minimalprinzip) oder mit einem bestimmten Mitteleinsatz ein höchst möglicher Ertrag (sog. Maximalprinzip) erzielt werden soll.“ „Bei einer wertmäßigen Betrachtung werden Aufwand und Ertrag oder Kosten und Erlös gegenübergestellt.“³⁰⁵ Neben dem Minimal- und dem Maximalprinzip kann noch das Optimalprinzip unterschieden werden. Ertrag und Mitteleinsatz werden nicht vorgegeben, sondern optimal dem Wirtschaftlichkeitsprinzip folgend aufeinander abgestimmt.³⁰⁶ Der Grad der Verwirklichung des Wirtschaftlichkeitsprinzips wird mit der Effektiv und der Effizienz gemessen.

„Unter **Effektivität** versteht man die Beurteilung der Zielerreichung, d. h. in welchem Ausmaß die geplanten Ziele auch tatsächlich erreicht worden sind.“³⁰⁷ Bei der Effektivität steht die Frage im Vordergrund, ob die richtigen Dinge gemacht werden. Die Frage lautet also: „Werden die Ziele erreicht?“. Die Effektivität wird mit der Wirtschaftlichkeit und Rentabilität gemessen.³⁰⁸

Unter **Effizienz** versteht man die Beurteilung der Beziehung zwischen der erbrachten Leistung und dem Ressourceneinsatz.“³⁰⁹ Bei der Effizienz wiederum steht die Frage im Vordergrund, ob die Dinge richtig gemacht werden. Die Fra-

³⁰² vgl. Thommen/Achleitner (2012).

³⁰³ Das ökonomische Prinzip wird auch Wirtschaftlichkeitsprinzip genannt.

³⁰⁴ vgl. Thommen/Achleitner (2012).

³⁰⁵ Gabler Verlag (2010).

³⁰⁶ vgl. Thommen/Achleitner (2012).

³⁰⁷ Thommen/Achleitner (2012).

³⁰⁸ vgl. Thommen/Achleitner (2012).

³⁰⁹ Thommen/Achleitner (2012).

ge lautet: „Wie werden die Ziele erreicht?“. Effizienten Prozessen liegen rationale Abläufe und minimaler Ressourcenverbrauch zu Grunde. Die Effizienz wird mit der Produktivität gemessen.³¹⁰

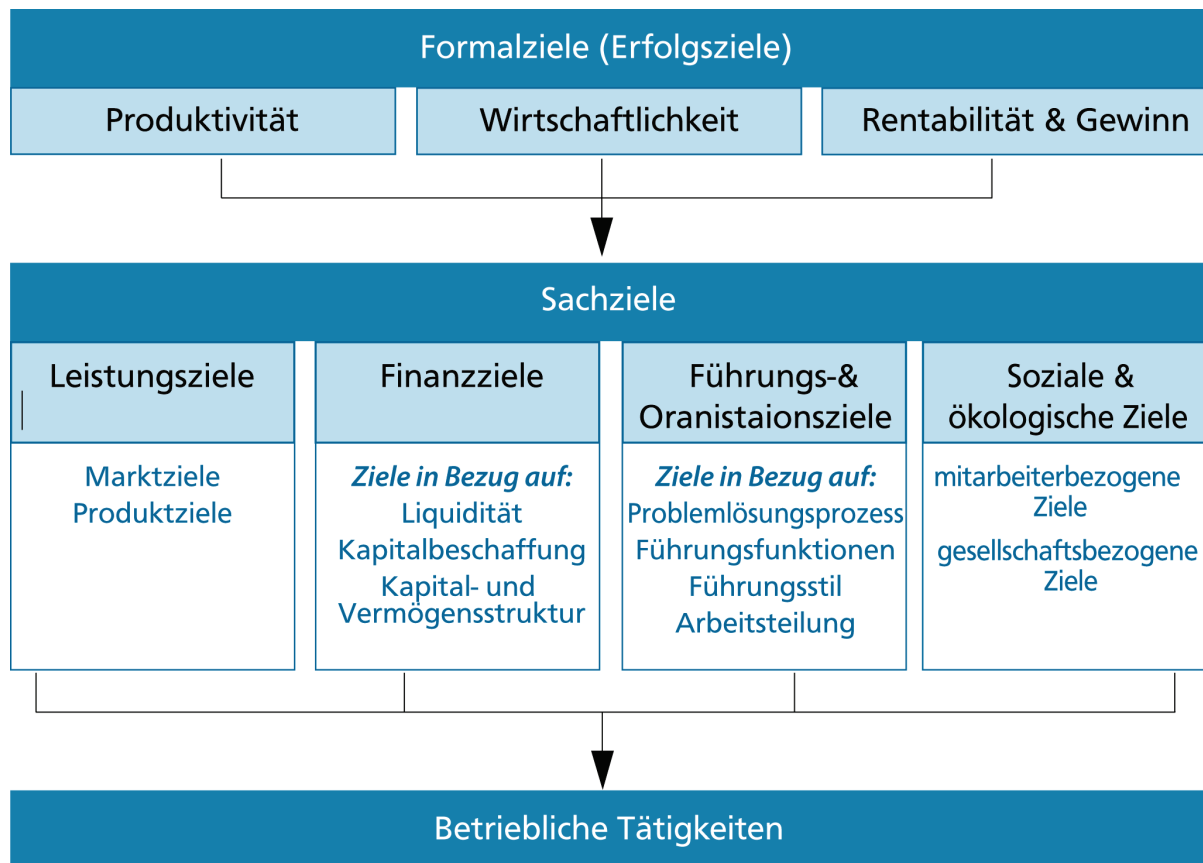


Abb. 2.34: Übersicht von allgemeinen Zielkategorien eines Unternehmens
Quelle: In Anlehnung an Thommen/Achleitner (2012).

Der Begriff **Erlös** wird im Rechnungswesen und in der Preis- und Markttheorie unterschiedlich definiert. Im Rechnungswesen ist der Erlös ein in Geld gemessener „Gegenwert aus Verkauf, Vermietung und Verpachtung von Produkten, Waren und Dienstleistungen.“ In der Preis- und Markttheorie ist Erlös das „Produkt aus Preis und Absatzmenge (Umsatz).“³¹¹

Der Begriff **Kosten** wird in dem Rechnungswesen und in der Volkswirtschaft unterschiedlich definiert. In der Volkswirtschaft stehen Kosten „für den bewerteten Güterverzehr in der Produktion.“ Im Rechnungswesen stehen die Kosten für den in Geld „bewerteten mengenmäßigen Güterverzehr zur Erstellung und

³¹⁰ vgl. Thommen/Achleitner (2012).

³¹¹ Gabler Verlag (2010).

zum Absatz von Sach- und/oder Dienstleistungen.“³¹² Wie in Abb. 2.35 beschrieben sind die „Kosten, die gleichzeitig Aufwendungen sind: Grundkosten und Anderskosten. Aufwendungen, die keine Kosten sind: neutraler Aufwand. Kosten, die keine Aufwendungen sind: Zusatzkosten.“³¹³

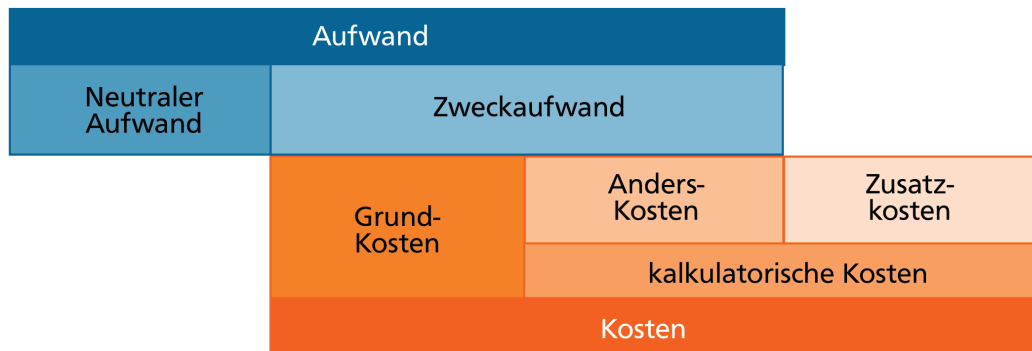


Abb. 2.35: Zusammenhang zwischen Aufwand und Kosten
Quelle: In Anlehnung an Gabler Verlag (2010)

Der **Gewinn** wird allgemein in der Preis- und Markttheorie berechnet, in dem vom Erlös die Kosten abgezogen werden. In der Kostenrechnung „ist der Betriebsgewinn die positive Differenz zwischen Erlösen und Kosten eines Abrechnungszeitraums (Betriebsergebnis).“

$$\text{Gewinn (G)} = \text{Erlös (E)} - \text{Kosten(K)} \quad \text{Formel 2.13}$$

Im Handelsrecht wird der Gewinn „im Rahmen der Gewinn- und Verlustrechnung (GuV) ermittelt und in der Bilanz ausgewiesen. Der Gewinn ist die positive Differenz zwischen Erträgen und Aufwendungen in einem Abrechnungszeitraum (Jahresüberschuss/-fehlbetrag).“³¹⁴

Die **Produktivität**, auch Ergiebigkeit oder Leistungsfähigkeit genannt, ist „das Verhältnis von Produktionsergebnis (Output) und der bei der Produktion eingesetzten Einsatzmengen (Input) aller Faktoren (totale Produktivität) oder einzelner Faktoren (partielle Produktivität) für ein einzelnes Produkt oder die Gesamtproduktion.“³¹⁵ Betriebswirtschaftlich dienen die Produktionskennziffern der Produktionsplanung und Wirtschaftlichkeitsanalyse und wird in der Perso-

³¹² Gabler Verlag (2010).

³¹³ Gabler Verlag (2010).

³¹⁴ Gabler Verlag (2010).

³¹⁵ Gabler Verlag (2010).

nalbedarfs- und Personaleinsatzplanung eingesetzt.³¹⁶ Dabei können unter anderem Arbeitsproduktivität, Maschinenproduktivität und Flächenproduktivität unterschieden werden.³¹⁷

Die **Rentabilität** ist eine wichtige betriebswirtschaftliche Kennzahl, die den wirtschaftlichen Erfolg einer Unternehmung beurteilt. Die Rentabilität ist das „Verhältnis einer Erfolgsgröße (Gewinn) zum eingesetzten Kapital oder zum Umsatz in einem bestimmten Zeitraum. Es lassen sich folgende Kennzahlen unterscheiden: Eigenkapitalrentabilität, Gesamtkapitalrentabilität und Umsatzrentabilität.“³¹⁸

$$\text{Rentabilität} = \text{Gewinn} / \text{eingesetztes Kapital} \quad \text{Formel 2.14}$$

Die **Wirtschaftlichkeit** ist das Werteverhältnis zwischen Ertrag und dem entstandenen Aufwand, welche in Geldeinheiten eingesetzt werden.³¹⁹ Der Wert ist eine dimensionslose Zahl. Allgemein wird unter Wirtschaftlichkeit das nachhaltig günstigste Verhältnis zwischen Nutzen und Kosten verstanden. Zweck der Wirtschaftlichkeitsberechnung³²⁰ ist die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit einer Handlung oder von beliebigen Objekten. Das können Systementwürfe, Produktionsverfahren, Angebote eines Produkts, eine Investition oder die Unternehmenstätigkeit insgesamt sein. Wegen der Vielfältigkeit und Unterschiedlichkeit der zu untersuchenden Handlungen oder Objekte, sind unterschiedliche Arten von Wirtschaftlichkeitsrechnungen erforderlich. Beispiele sind die Kosten-Nutzen-Analyse sowie die Nutzwertanalyse. Für die Beurteilung von Investitionen kommt die Investitionsrechnung zum Einsatz.³²¹

2.3.3.2. Beurteilung von Investitionsalternativen

Allgemein ist eine **Investition** die Verwendung von Kapital bzw. die Umwandlung von Kapital in Vermögen.³²² Investitionen können in drei verschiedene

³¹⁶ vgl. Gabler Verlag (2010).

³¹⁷ vgl. Thommen/Achleitner (2012).

³¹⁸ Gabler Verlag (2010).

³¹⁹ vgl. Thommen/Achleitner (2012).

³²⁰ Teilweise auch Wirtschaftlichkeitsanalyse genannt.

³²¹ vgl. Warnecke (1996); Weber (o. J.).

³²² vgl. Becker (2011).

Arten unterteilen werden, die Sachinvestitionen, Finanzinvestitionen und die immateriellen Investitionen.³²³

Existieren nun mehrere Alternativen einer Investition, müssen diese Alternativen beurteilt werden, damit eine Entscheidung gefällt werden kann. Wie bei den meisten Entscheidungsprozessen gibt es neben den monetären Einflussgrößen noch andere Einflussgrößen. Das können technische, rechtliche, andere ökonomische oder auch persönlichen Aspekte sein. Für komplexe Entscheidungen beschreibt Pawellek (2008b) einen dualen Bewertungsansatz, bei dem neben dem Nutzen parallel auch die Wirtschaftlichkeit untersucht wird (Abb. 2.36).³²⁴ In dieser Arbeit werden für die Entscheidung über Investitionsalternativen nur rein ökonomische Aspekte berücksichtigt, um die finanziellen Konsequenzen einer Investition zu berechnen. Damit können drei zentrale Fragestellungen der Investitionsrechnung beantwortet werden:

- 1) Vorteilhaftigkeit: Ist eine bestimmte Investition im Sinne der Gewinnerzielung, unter Berücksichtigung der Risiken, vorteilhaft oder nicht?
- 2) Wahlprobleme: Welche Investitionsalternative ist die für das Unternehmen die optimale?
- 3) Ersatzproblem: Wann ist der richtige Zeitpunkt für eine Ersatzinvestition?³²⁵

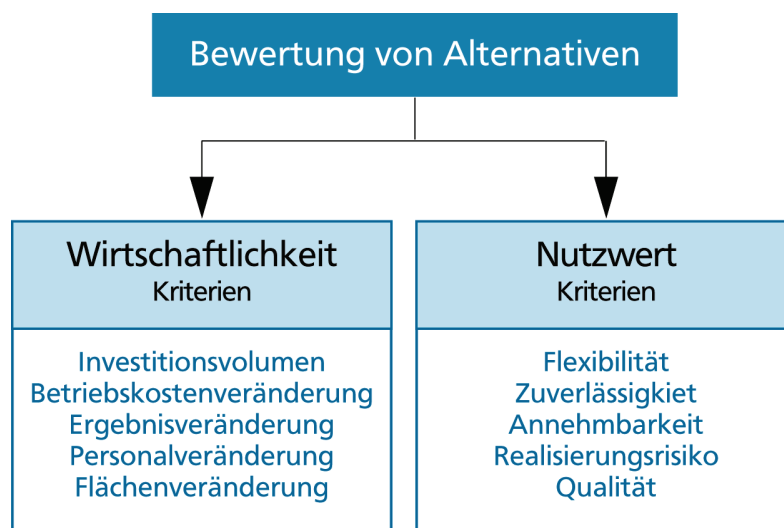


Abb. 2.36: Dualer Bewertungsansatz zur Bewertung von Investitionsalternativen
Quelle: In Anlehnung an Pawellek (2008b)

³²³ vgl. Becker (2011); Ermschel/Möbius/Wengert (2011).

³²⁴ vgl. Pawellek (2008b).

³²⁵ vgl. Ermschel/Möbius/Wengert (2011).

Die optimale Investitionsalternative ist diejenige, welche in dem betrachteten Zeitraum den höchsten Gewinn erwirtschaften wird. In der Betriebswirtschaftslehre stehen für die Investitionsrechnung mehrere Verfahren zur Verfügung. Die Verfahren werden in statische und dynamische Verfahren unterschieden. Abb. 2.37 gibt einen Überblick über die statischen und dynamischen Modelle.

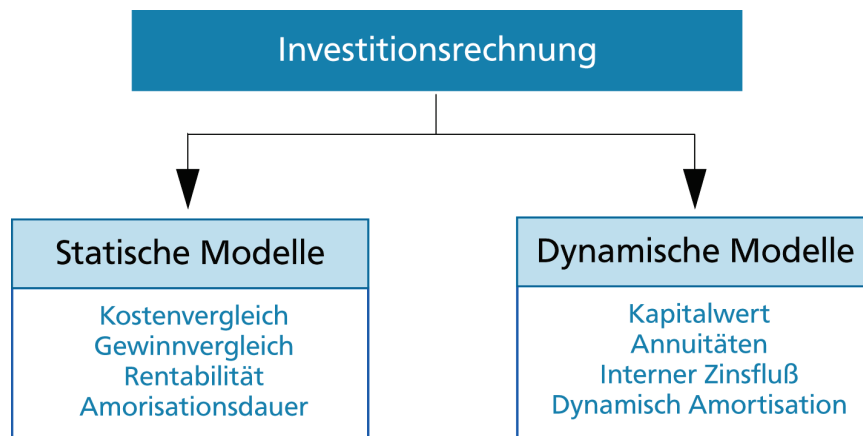


Abb. 2.37: Verfahren der Investitionsrechnung
Quelle: In Anlehnung an Ermschel/Möbius/Wengert (2011).

Statische Verfahren ziehen zur Bewertung nur die Durchschnittswerte der Referenzzahlen aus Ein- und Auszahlungen heran. Bei stark unterschiedlichen Zahlungsstrukturen kann eine Durchschnittsbetrachtung jedoch nur Näherungswerte liefern.³²⁶

Bei den **dynamischen Verfahren** werden alle die Investition betreffenden Ein- und Auszahlung zum Zeitpunkt derer tatsächlichen Tätigkeit erfasst und auf einen Zeitpunkt der Investitionsdauer diskontiert. Durch die Diskontierung aller Zahlungsströme wird der Barwert der Investition berechnet. Der Barwert ist ein monetärer Wert, welcher die zukünftigen Zahlungen zu Beginn der Investition haben.³²⁷ Es gilt der Grundsatz: „Heute verfügbares Geld ist mehr wert als künftiges.“ Übersteigt der Barwert der Einnahmen den Investitionsaufwand, wird die Investition als wirtschaftlich betrachtet.³²⁸

Im folgenden Abschnitt wird beispielhaft die Kapitalwertmethode erklärt, welche in Kapitel 6.1 zum Einsatz kommt. Diese Methode errechnet die Summe

³²⁶ vgl. Ermschel/Möbius/Wengert (2011).

³²⁷ vgl. Becker (2011).

³²⁸ vgl. Coenenberg/Fischer/GLunther (2007).

aller Barwerte der Ein- und Auszahlungen der Investition. Diese Zahlungen werden mit einem Zinssatz auf ihren Wert zu Beginn der Investition diskontiert.³²⁹ Der Diskontierungszinssatz muss der Finanzierungsart angepasst werden. So ist der Zinssatz von Eigenkapital meist höher als bei Fremdkapital. Außerdem kann zwischen Soll- und Habenzinssatz unterschieden werden. Vereinfachend kann der Soll- und Habenzinssatz als gleich angesehen werden.³³⁰ Damit berechnet sich der Kapitalwert wie folgt:

$$K_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E_t - A_t}{(1+i)^t} + \frac{L_n}{(1+i)^n} \quad \text{Formel 2.15}$$

Zunächst folgt eine Auszahlung A_0 zum Zeitpunkt der Anschaffung $t = 0$. Jede weitere Auszahlung A_t und Einzahlung E_t wird mit dem gewählten Diskontierungszinssatz i auf ihren Barwert diskontiert. Am Ende des betrachteten Zeitraums $t = n$ kann ein Liquidationserlös L_n der Investition stehen. Ergibt sich aus dieser Rechnung ein positiver Kapitalwert K_0 , erwirtschaftet die Investition eine größere Verzinsung als der Diskontierungszinssatz i und ist somit vorteilhaft. Der wohl schwerwiegendste Nachteil dieser Methode ist die Notwendigkeit einer recht genauen Schätzung des Zeitpunktes und der Höhe von in der Zukunft liegenden Zahlungsströmen.³³¹

Problem der Unsicherheit

Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse bzw. Investitionsrechnung erfordert Vorhersagen zukünftiger Entwicklungen und Zustände und ist daher grundsätzlich mit Unsicherheit behaftet. Je später ein Kosten- oder Nutzenfaktor in der Zukunft wirksam wird, desto unsicherer ist die Aussage, die zum Zeitpunkt der Betrachtung über seine tatsächliche Höhe möglich ist. Für die Beurteilung einer Investition ist somit neben der Betrachtung des Gewinns auch eine Risikobeurteilung der Investition wichtig. Eine Möglichkeit das Risiko abschätzen zu können, ist die Anwendung der Szenarioanalyse. Die Grundidee der Szenarioanalyse ist, alle relevanten Faktoren in einer Bandbreite zu verändern, um so die Bandbreite des Ergebnisses abschätzen zu können. Zunächst werden die Faktoren identifiziert, welche den Untersuchungsgegenstand beeinflussen. Anschließend wer-

³²⁹ vgl. Ermschel/Möbius/Wengert (2011).

³³⁰ vgl. Becker (2011).

³³¹ vgl. Becker (2011).

den die Entwicklungsmöglichkeiten dieser Faktoren abgeschätzt, um aus den möglichen Entwicklungslinien der Faktoren Zukunftsszenarien zu erstellen.³³² Dabei ist es hilfreich, drei Szenarien zu betrachten: Zunächst sollte die Simulation mit dem wahrscheinlichsten Szenario durchgeführt werden. Um diese Simulation bezüglich des Risikos besser beurteilen zu können, sollten zwei extreme Szenarien ergänzt werden. Zum einen ein sehr optimistisches Szenario (Best-Case-Szenario), zum anderen ein sehr pessimistisches Szenario (Worst-Case-Szenario).

Eine andere Methode das Risiko abschätzen zu können ist die Sensitivitätsanalyse. Bei dieser Analyse werden nicht alle Faktoren zur gleichen Zeit zu einem bestimmten Szenario verändert. Es wird jeder Faktor für sich in einem definierten Bereich variiert (beispielsweise $\pm 20\%$). Dabei wird beobachtet, wie das Modell reagiert. Bei dieser Methode kann nicht das gesamte Risiko abgeschätzt werden, aber es kann abgeschätzt werden, wie stark das Modell auf die einzelnen Faktoren reagiert. Somit ist es möglich, die wichtigen Einflussparameter eines Modells zu identifizieren, mit denen sich das Ergebnis stark beeinflussen lässt.

³³² vgl. Zümi (2004); Mietzner (2009).

3. Analyse kritischer Parameter zum Aufbau einer Produktion

Bis heute gibt es keine systematische Untersuchung des Produktionsprozesses für druckbare Elektronik. Bisher wurden entweder Einzelprozesse optimiert oder Laborprozesse betrachtet, um die Machbarkeit von druckbarer Elektronik zu zeigen. Über diese Machbarkeit hinaus werden Laborprozesse wie beispielsweise Spincoating in upscalefähige³³³ Verfahren wie Tiefdruck übertragen. In diesem Zusammenhang wird auch häufig von Roll-to-Roll oder Massenproduktion gesprochen, aber eine detaillierte Betrachtung der Produktion findet nicht statt. Der nächste notwendige Schritt in Richtung Massenproduktion von druckbarer Elektronik ist, diese Laborprozesse auf eine industrielle Fertigung zu übertragen. Um diesen Skalierungsschritt machen zu können, bedarf es neben der Optimierung der Leistungsfähigkeit der Devices und der Nutzung von produktiven Fertigungsverfahren, vor allem einer Optimierung hinsichtlich der Produktion. Das vorliegende Kapitel erarbeitet die Grundlagen für eine Optimierung der Produktion, indem die Faktoren identifiziert werden, welche einen Einfluss auf die Produktion haben. Das Ziel dieses Kapitels ist, technische und wirtschaftliche Entscheidungskriterien zu definieren, anhand derer eine Entscheidung zum Aufbau einer Produktion getroffen und begründet werden kann. Die Leitfrage lautet: Wie kann aus einem Produkt eine Produktion abgeleitet werden?

In Kapitel 3.1 wird zunächst der Produktionsprozess von organischer Photovoltaik in Einzelprozesse unterteilt und die Einzelprozesse werden im Detail beschrieben. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3.2 der Produktionsprozess systematisch auf Einflussfaktoren analysiert, welche die Auslegung einer Produktion beeinflussen können. Diese Parameter werden beschrieben und kategorisiert. In Kapitel 3.3 werden die Einflussparameter auf technische und wirtschaftliche Aspekte hin untersucht. Danach werden diese Parameter evaluiert, um eine Auswahl zu treffen, die in Kapitel 4 näher untersucht werden.

³³³ Der englische Begriff „upscaling“ kann in diesem Zusammenhang am besten mit „hochskalieren“ übersetzt werden. Dieser Begriff hat sich in der Community der druckbaren Elektronik etabliert und wird auch in der deutschen Sprache verwendet.

3.1. Darstellung des Fertigungsprozesses von organischer Photovoltaik

Das Ziel dieses Unterkapitels ist die Darstellung des Fertigungsprozesses von OPV in einer möglichst allgemeinen Form. Diese Darstellungsform berücksichtigt alle wesentlichen Faktoren, die der Fertigung der verschiedenen Solarzellentypen gemein sind und basiert unter anderem auf der Darstellung in der vom Autor betreuten Studienarbeit von Heßberger (2012).³³⁴ Auch wenn verschiedene OPV-Zellentypen existieren, lässt sich deren Produktion auf einige wesentliche Faktoren reduzieren. Die Systemgrenze wird in diesem Fall so gelegt, dass die Substratproduktion und der Zusammenbau des Produkts nicht mehr betrachtet werden. Somit beginnt der hier betrachtete Prozess mit einem leeren Substrat und endet mit einer funktionsfähigen OPV-Zelle. Dessen Kontaktierung und Integration in andere Produkte steht allerdings noch aus. Abb. 3.1 zeigt eine allgemeine Darstellung des Produktionsprozess von OPV. Die gestrichelte Linie zeigt in diesem Prozess die Systemgrenze.

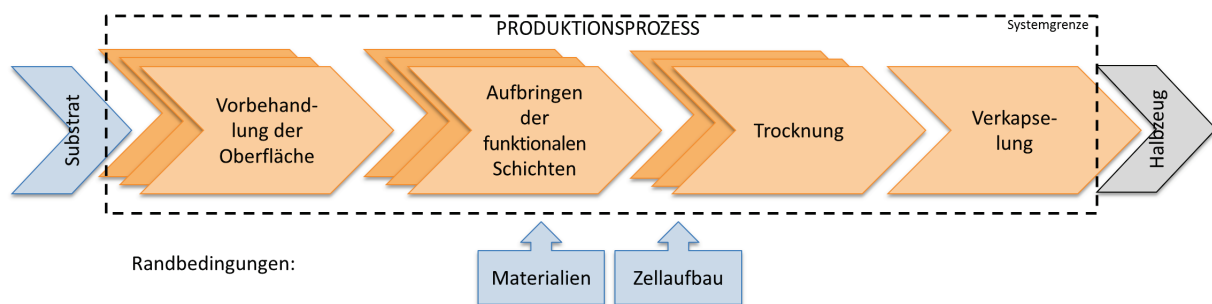


Abb. 3.1: Allgemeine Darstellung des Produktionsprozesses von OPV
Quelle: In Anlehnung an Heßberger (2012)

Ausgehend von dem Substrat muss dieses zunächst für das Aufbringen der Schichten vorbereitet werden. Dazu zählen Prozessschritte wie Reinigung des Substrats oder Behandlung der Oberfläche, um die Benetzbarkeit für die nass-chemischen Beschichtungsverfahren zu gewährleisten. Diese Vorbereitungsschritte müssen gegebenenfalls für jede aufzutragende Schicht wiederholt werden. Allerdings sind gerade organische Materialien sehr empfindlich gegenüber solchen Vorbehandlungen, so dass nur ausgewählte Verfahren eingesetzt werden können. Daraufhin können die ausgewählten Funktionsmaterialien aufgebracht werden. Eine OPV-Zelle besteht je nach Zellaufbau aus mehreren

³³⁴ vgl. Heßberger (2012).

übereinander liegenden Schichten: die zwei Elektroden Anode und Kathode, sowie die p- und n-Halbleiter. Häufig werden noch weitere Schichten aufgebracht, die beispielsweise für besseren Ladungsträgertransport sorgen. Je nach eingesetztem Material folgt jeweils ein Trocknungsschritt, indem die Lösemittel aus der Schicht ausgetrieben werden und nur noch das Funktionsmaterial auf dem Substrat verbleibt. Bei bestimmten Materialien können auch noch Aktivierungs- oder Sinterschritte notwendig werden. Der letzte Schritt ist die Verkapselung, bei der eine Schutzschicht aufgebracht wird, um die empfindlichen Funktionsschichten vor Umwelteinflüssen zu schützen. Als Schutzschicht werden aktuell Folien oder Gläser aufgeklebt.

3.1.1. 1. Teilprozess: Vorbehandlung der zu bedruckenden Oberfläche

Ziel des Teilprozesses „Vorbehandlung der zu bedruckenden Oberfläche“ ist die Vorbereitung zur Aufbringen der nächsten Schicht. Im ersten Schritt betrifft dies die Substratoberfläche, bei den folgenden Schritten die jeweils letzte aufgebrachte Schicht. Dazu sind zwei Teilprozesse notwendig: zum einen das Reinigen des Substrats und zum zweiten das Anpassen der Oberflächenspannung. Ziel des Reinigungsschritts ist das Entfernen sämtlicher Staubteilchen sowie der Fett- und Trennmittelreste. Dafür kommen unterschiedliche Methoden zum Einsatz. Im Labor werden die Substrate meist in Ultraschallbädern gereinigt. Als Reinigungsmittel kommen dabei mit Tensiden versetztes Wasser, deionisiertes Wasser, Aceton und Isopropanol zum Einsatz.³³⁵ Der zweite Teilprozess, das Einstellen der Oberflächenspannung, wird benötigt, um die Benetzung des Funktionsfluids auf dem Substrat zu beeinflussen. Für ein perfektes Benetzen (sogenanntes Wetting) ist es notwendig, dass die Oberflächenenergie des Substrats gegenüber Luft größer ist als die Summe aus der Oberflächenspannung des Funktionsfluids gegenüber Luft und der Grenzflächenenergie des Substrats gegenüber des Funktionsfluids.³³⁶

$$\sigma_L + \sigma_{LS} < \sigma_S \quad \text{Formel 3.1}$$

Wobei σ_L die Oberflächenspannung des Funktionsfluids, σ_S die Oberflächenenergie von Substrat gegen Luft, und σ_{LS} die Oberflächenenergie gegen das Funktionsfluid sind. σ_L ist gerade für flexible Foliensubstrate häufig zu niedrig

³³⁵ vgl. Girotto u. a. (2009).

³³⁶ vgl. Brezesinski/Mögel (1993).

für eine Benetzung und muss durch geeignete Verfahren erhöht werden. Allerdings neigen Funktionsfluide unter den in der Formel 3.1 beschriebenen Bedingungen bisweilen zum unkontrollierten Verlaufen auf dem Substrat, was die Kontrolle der Ränder der Flächen und der Schichtdicke negativ beeinflussen kann. Werden für eine Schicht exakte Linien oder Flächen mit hoher Rand-schärfe benötigt, sollte die Oberflächenenergie des Substrats gegenüber Luft σ_S ungefähr gleich der Summe aus σ_L und σ_{LS} sein.³³⁷ Entnetzung (sogenanntes Dewetting) liegt dann vor, wenn die Grenzflächenenergie des Substrats gegenüber dem Funktionsfluid größer ist, als die Summe aus der Oberflächenspannung des Funktionsfluids gegenüber Luft und der Oberflächenenergie des Substrats gegenüber Luft.

$$\sigma_{LS} > \sigma_L + \sigma_S \quad \text{Formel 3.2}$$

Abb. 3.2 zeigt den Unterschied zwischen schlechter, guter und vollständiger Benetzung. Daraus wird ersichtlich, dass aus produktionstechnischer Sicht nur der zweite Fall gut beherrschbar ist. Die anderen beiden Fälle sind unerwünscht, da unter diesen Umständen eine definierte Fläche nicht kontrollierbar herzustellen ist. Bei schlechter Benetzung entnetzt das Fluid auf der Oberfläche und bei vollständiger Benetzung verläuft das Fluid auf dem Substrat (auch Spreitung genannt), so dass die geplante Struktur nicht realisiert werden kann.

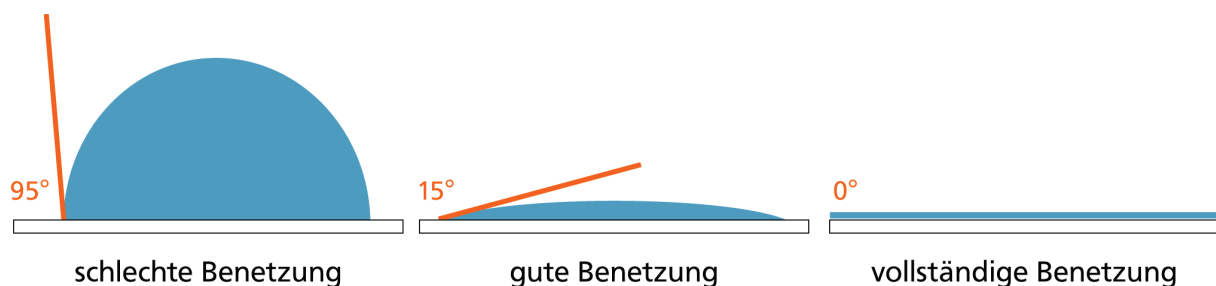


Abb. 3.2: Unterschied zwischen schlechter, guter und vollständiger Benetzung.

Zur Anpassung der Oberflächenenergie des Substrats werden heute vor allem zwei Verfahren verwendet. Entweder kommt eine Plasma-Vorbehandlung³³⁸ oder eine UV/Ozon-Vorbehandlung zum Einsatz.³³⁹ Beide Verfahren arbeiten

³³⁷ vgl. Sauer (2012b).

³³⁸ vgl. Giroto u. a. (2009).

³³⁹ vgl. Na u. a. (2010). Vak u. a. (2007).

ohne Berührung des Substrats und sind sehr schnell.³⁴⁰ Allerdings verbessern diese Verfahren nur die Benetzbarkeit des Substrats durch elektrisch relativ polare Flüssigkeiten wie etwa Wasser- oder Ethanol-basierte Fluide. Die Benetzung durch Fluide, die weitgehend nur unpolare organische Lösemittel enthalten, wird nur geringfügig verändert.³⁴¹

Die meisten der heutigen OPV-Layouts verwenden, je nach Aufbau der Solarzelle, ITO³⁴² als Anode. Auch wenn bereits intensiv an ITO-freien Layouts gearbeitet wird, hat ITO aktuell noch große Vorteile. So sind ITO-Schichten, im Vergleich zu anderen transparenten Elektroden, bei vergleichsweise guter Leitfähigkeit sehr transparent.³⁴³ ITO wird unter Hochvakuum mit Sputter-Verfahren aufgebracht.³⁴⁴ Erste Versuche zeigen, dass ITO durchaus auch druckbar ist. Allerdings ist die Leitfähigkeit der Schicht deutlich geringer als bei gesputterten ITO-Schichten.³⁴⁵ Substrate mit einer vollflächigen ITO-Beschichtung werden meistens als Halbzeug zugekauft, so dass die erste Funktionsschicht nicht auf das Substrat, sondern auf die ITO-Schicht aufgebracht werden muss. Wird eine strukturierte Anode benötigt, muss das ITO nachträglich strukturiert werden, was meist durch Ätzen geschieht. Abb. 3.3 zeigt den ersten Teilprozess, die Vorbehandlung der zu bedruckenden Oberfläche. Dieser Prozess wird unter Umständen für jede aufzubringende Schicht erneut durchlaufen.

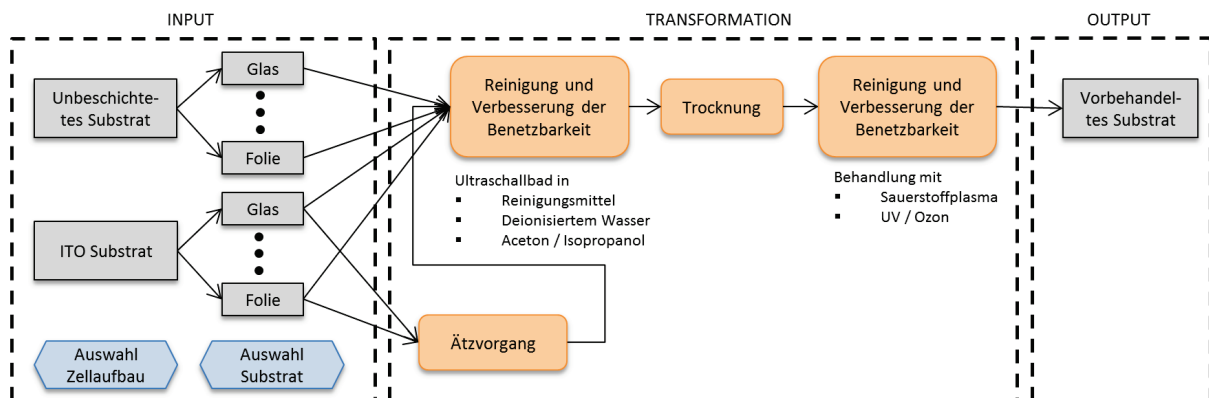


Abb. 3.3: Erster Teilprozess: Vorbehandlung der zu bedruckenden Oberfläche
Quelle: In Anlehnung an Heßberger (2012)

³⁴⁰ Plasmabehandlung unter Vakuum dauert sehr lange, so dass hier nur die Plasmabehandlung unter Atmosphäre gemeint ist.
³⁴¹ vgl. Klauk (2006); Sauer (2012b).
³⁴² ITO; engl. für indium tin oxide, Indiumzinnoxid
³⁴³ vgl. Müller-Meskamp u. a. (2012).
³⁴⁴ Sputter Verfahren heißt auf Deutsch Kathodenzerstäubung. Vgl. Kapitel 2.2.1.2.
³⁴⁵ vgl. Adam (2010).

Die Vorbehandlung muss auf die zu bearbeitende Schicht angepasst werden. Das unbedruckte Substrat wird zunächst gereinigt, getrocknet und dann gegebenenfalls weiter vorbehandelt. Handelt es sich um ein mit ITO beschichtetes Substrat, wird häufig zur Strukturierung ein Ätzschritt vorgeschaltet. Daraufhin können erneut Reinigungs- und Vorbehandlungsschritte durchgeführt werden.

3.1.2. 2. Teilprozess: Applizieren der funktionalen Schichten

Das Ziel des Teilprozesses „Applizieren der funktionalen Schichten“ ist es, entsprechend der im OPV-Layout festgelegten Schichtabfolge, die notwendigen Einzelschichten nacheinander auf das Substrat zu bringen. Hierfür steht eine große Zahl von Fertigungsverfahren zur Verfügung, die in Kapitel 2.2.1 beschrieben wurden. So muss zunächst für jede Schicht das passende Verfahren ausgewählt werden. Die Auswahl von Produktionsverfahren wird in Kapitel 4.2.1 näher beschrieben. Im folgenden Abschnitt werden die Verfahren vorgestellt, die bereits in der Literatur untersucht wurden und sich für das Aufbringen bestimmter Schichten eignen. Im nächsten Absatz wird zunächst das Aufbringen der fotoaktiven Schicht näher beschrieben. Das Aufbringen der anderen funktionalen Schichten wie Anode, Kathode und Lochleiter werden in den darauf folgenden Abschnitten beschrieben.

Beim **Aufbringen einer fotoaktiven Schicht** können zwei Auftragungsprinzipien unterschieden werden: das Aufbringen aus der Gasphase, wie das Aufdampfen oder Sputtern, und das Aufbringen aus der Flüssigphase, wie das Drucken oder Coaten.

Zum Aufbringen aus der **Gasphase** zählen unter anderem die Verfahren Vacuum Thermal Evaporation (VTE) und das verbesserte Organic Vapor Phase Deposition (OVPD).³⁴⁶ Diese Verfahren erfordern das Arbeiten im Vakuum. Beim Aufdampfen wird das Material erhitzt und somit vom festen in den gasförmigen Zustand überführt. Das zu beschichtende Substrat liegt einige Zentimeter entfernt der Probe gegenüber. Das gasförmige Funktionsmaterial legt sich in einem Resublimationsprozess auf dem Substrat nieder und bildet somit eine Schicht.³⁴⁷ Der Vorteil dieser Verfahren für OPV liegt darin, dass die Schichtdicke sehr exakt eingestellt werden kann. Darüber hinaus ist es mit Aufdampfver-

³⁴⁶ vgl. Schwampera u. a. (2002).

³⁴⁷ vgl. Forrest (2004).

fahren auch möglich, vermischte Schichten aufzubringen, wie es beim Bulk-Heterojunction-Prinzip notwendig ist. Eine Möglichkeit besteht darin, in der ersten Schicht eine hohe Rauigkeit zu erzeugen, so dass das zweite Funktionsmaterial in diese Zwischenräume eindringen kann. Eine etwas besser geeignete Methode ist das Alternative Thermal Deposition (ATD) Verfahren, welches ein modifiziertes VTE-Verfahren ist. Hierbei werden die beiden Materialien, in diesem Falle der n-Halbleiter, auch Elektronenleiter genannt, und der p-Halbleiter, auch Lochleiter genannt, in zwei nebeneinander liegenden Kammern gleichzeitig verdampft. Über den Materialien befindet sich ein Drehteller, auf dem Substrate aufgebracht sind. Durch das Drehen nehmen die Substrate abwechselnd die verschiedenen Materialien auf. Mit Hilfe der Drehgeschwindigkeit kann die Zusammensetzung der Mischung beeinflusst werden.³⁴⁸

Die zweite Möglichkeit Schichten zu erzeugen ist die Prozessierung aus der **Flüssigphase**. Hierfür werden die Funktionsmaterialien, die als Feststoff vorliegen, mit Lösemittel versetzt und so in eine flüssigprozessierbare Form gebracht. Damit können diese nun durch Verfahren wie dem Drucken oder Coaten prozessiert werden. Bei der Herstellung der aktiven Schicht von organischen Solarzellen kommen in Laboren häufig Verfahren wie Slot-Die-Coating oder Knife-Coating, Tiefdruck, Siebdruck, Inkjet sowie weitere Verfahren wie Spray-Coating oder Brush-Coating zum Einsatz. Knife- und Slot-Die-Coating eignen sich sehr gut, um aktive Schichten aufzubringen, da die Schichten sehr homogen sind und die Schichtdicken über Formulierung und Maschinenparameter gut eingestellt werden können.³⁴⁹ Mit dem **Tiefdruckverfahren** wurde in mehreren Studien P3HT und PCBM verdruckt. Mit diesem Verfahren wurden sehr gute Schichten erzeugt.³⁵⁰ Damit wurden auch bereits für Labormaßstäbe sehr große Solarzellen mit einer aktiven Fläche von über 15 cm² gedruckt,³⁵¹ sowie Solarzellen, bei denen drei Materialien (P3HT, PCBM und PEDOT:PSS) im Tiefdruck verarbeitet wurden.³⁵² Voigt u. a. halten daher das Tiefdruckverfahren für das Aufbringen der aktiven Schicht für geeignet.³⁵³ Der **Siebdruck** wird meist für andere Schichten der Solarzellen eingesetzt, eignet sich aber grundsätzlich mit modifizierten Materialien auch für das Aufbringen der akti-

³⁴⁸ vgl. Kim/Kim/u. a. (2011).

³⁴⁹ vgl. Blankenburg u. a. (2009); Zimmermann u. a. (2011); Wengeler u. a. (2011); Wengeler u. a. (2012).

³⁵⁰ vgl. Kopola u. a. (2010).

³⁵¹ vgl. Kopola u. a. (2011).

³⁵² vgl. Voigt u. a. (2011).

³⁵³ vgl. Krebs/Tromholt/Jorgensen (2010).

ven Schicht, sofern geeignete, siebdruckfähige Fluide zur Verfügung stehen.³⁵⁴ Die Schichtdicken des Siebdrucks sind tendenziell höher als bei anderen Verfahren, so dass hier das Layout und die Formulierungen angepasst werden müssen.³⁵⁵ Auch das **Inkjet**-Verfahren kommt häufig zum Einsatz. Die Menge der Publikationen ist sicherlich auch dem Umstand zu verdanken, dass Labor-Inkjet-Drucker relativ günstig zu erwerben sind und diese ohne grundlegende Kenntnis über den Druckprozess und Druckmaschinen zu betreiben sind. Inkjet-Drucker sind außerdem sehr gut für die meist sehr niedrigviskosen Funktionsfluide geeignet. Darüber hinaus ist es möglich, bereits kleinste Mengen von wenigen Millilitern an Funktionsmaterial im Inkjet-Verfahren zu verdrucken. Die aktiven Schichten der OPV sowie die PEDOT:PSS Schicht sind im Inkjet druckbar, wobei beim Inkjet die große Herausforderung ist, große homogene Schichten zu erzeugen.³⁵⁶

Beim Aufbringen der **anderen funktionalen Schichten** wie Anode, Kathode oder der Lochleiterschicht gilt zunächst auch die Unterscheidung zwischen Beschichten aus der Gasphase und der Flüssigphase.

Als **Anode** kommt sehr häufig ITO zum Einsatz, da es zum einen eine hohe Leitfähigkeit aufweist und transparent ist, und zum anderen die Austrittsarbeit zu den HOMO-Energien des Halbleiters passt und die Injektionen von Löchern vom ITO in den p-Halbleiter sehr effizient ist. Neben der aufwendigen und energieintensiven Herstellung und Verarbeitung, ist vor allem der Preis von ITO hinderlich für die angestrebten günstigen Produkte der druckbaren Elektronik. Aus diesen Gründen wird bereits intensiv nach alternativen Lösungen gesucht. Eine Alternative ist unter anderem ein aus feinen Silberlinien bestehendes Gitter, welches mit hochleitfähigem PEDOT:PSS beschichtet wird. Neben den Kostenvorteilen lässt sich diese Anode komplett drucktechnisch herstellen. Die Effizienz dieser Solarzellen liegt allerdings deutlich unter den mit ITO-Anode.³⁵⁷ Müller-Meskamp u.a. (2012) untersuchten systematisch die Alternativen zu ITO als transparente leitfähige Elektrode, da diese in allen optischen Devices der druckbaren Elektronik wie OPVs und OLEDs benötigt werden. Eine Zusammen-

³⁵⁴ vgl. Zhang/Chae/Cho (2009).

³⁵⁵ vgl. Krebs u. a. (2009).

³⁵⁶ vgl. Teichler u. a. (2011).; Lange u. a. (2010).

³⁵⁷ vgl. Krebs/Gevorgyan/Alstrup (2009).; Zimmermann u. a. (2011).

fassung der Ergebnisse ist in Tabelle 3.1 dargestellt.³⁵⁸ Für eine Massenfertigung mit Druckverfahren auf flexiblen Substraten eignen sich die Technologien Silbernanodraht, Carbon Nanotube Netzwerke, leitfähige Polymere, Metallschichten oder Graphene eignen.³⁵⁹

Tabelle 3.1: Übersicht über verschiedene transparente Elektrodentechnologien und deren Eigenschaften.
Quelle: In Anlehnung an Müller-Meskamp u.a. (2012)

Technologie	Schichtwiderstand [Ohm/square]	Transmission [%]	Referenz
ITO als Rekordreferenz (durch Pulsed Laser Deposition)	11	92 % im sichtbaren Spektralbereich ohne Substrat	Kim et al. (1999)
Silbernanodraht Netzwerk	8	80% diffus im sichtbaren Spektralbereich	Hu et al. (2010)
Metall Dünnschicht + Grid (Ni+ Cu)	7	75% bei 550nm	Ghosh et al. (2010)
Graphene	30	90% bei 550nm ohne Substrat	Bae et al. (2010)
PEDOT:PSS	65	80% bei 550nm	Kim et al. (2011)
Carbon Nanotube Netzwerk	84	90% bei 550nm	Nasibulin et al. (2011)

Als **Kathode** wird meistens eine Al/LiF-Schicht³⁶⁰ verwendet, dessen Austrittsarbeit sehr gut zu dem LUMO-Niveau des Halbleiters passt und günstige Bedingungen für die Injektion von Elektronen schafft. Dieses Material kann nicht gedruckt werden und muss daher aufgedampft werden. Auch hier gibt es Bestrebungen aus Kostengründen eine Kathode zu verwenden, die gedruckt werden kann. Dabei kommen vor allem druckfähige Silber-Tinten mit Nanopartikeln zum Einsatz, da die Austrittsarbeit von Silber der von Aluminium ähnlich ist.³⁶¹ Als **Lochleiter** kommt meistens PEDOT:PSS zum Einsatz, welches direkt auf die Anode aufgebracht wird. Dieses Material ist flüssig, verdruckbar und wird häufig im Slot-Die-Verfahren oder im Siebdruck aufgebracht.³⁶²

³⁵⁸ Der Schichtwiderstand wird auch Flächenwiderstand genannt und beschreibt den elektrischen Widerstand einer Schicht, wenn diese parallel zur Schicht von Strom durchflossen ist. Der Schichtwiderstand kann zum Beispiel mit Hilfe der Vier-Punkt-Methode gemessen werden. Vgl. Schroder (2006).

Die Transmission beschreibt die Durchlässigkeit eines Mediums für Wellen wie beispielsweise Licht (elektromagnetische Wellen). Trifft eine Welle auf ein anderes Medium endlicher Dicke, so wird sie je nach den Stoffeigenschaften zum Teil an den Grenzflächen reflektiert und beim Durchqueren ganz oder teilweise absorbiert. Der Rest wird durch das Medium transmittiert und tritt an der gegenüberliegenden Seite des Mediums aus. Vgl. Nič u. a. (2012).

³⁵⁹ vgl. Müller-Meskamp u. a. (2012); Kim u. a. (1999); Hu u. a. (2010); Ghosh/Chen/Pruneri (2010); Bae u. a. (2010); Kim/Sachse/u. a. (2011); Nasibulin u. a. (2011).

³⁶⁰ Al/LiF ist Aluminium dotiert mit Lithiumfluorid. Alternativ kann auch Aluminium mit Calcium eingesetzt werden.

³⁶¹ vgl. Krebs/Gevorgyan/Alstrup (2009).

³⁶² vgl. Krebs (2009c).

PEDOT:PSS wurde von den Herstellern bereits in vielen verschiedenen Formulierungen an verschiedene Auftragsverfahren angepasst. So existieren auch Formulierungen, die sich auch im Flexodruck und Tiefdruck verarbeiten lassen.³⁶³

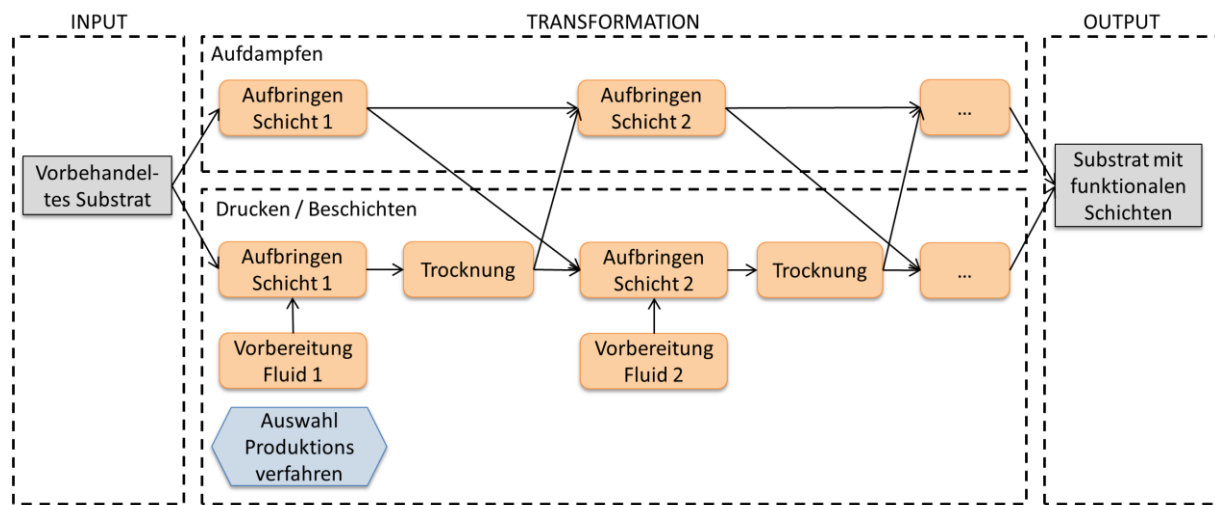


Abb. 3.4: Zweiter Teilprozess: Aufbringen der funktionalen Schichten
Quelle: In Anlehnung an Heßberger (2012)

Abb. 3.4 zeigt den Teilprozess „Aufbringen der funktionalen Schichten“. Darin wird deutlich, dass bei jeder Schicht entschieden werden muss, ob das Material aus der Gasphase oder der Flüssigphase aufgebracht werden soll. Wird eine Schicht gedruckt, müssen für diesen Schritt das Fluid sowie das Substrat vorbereitet werden und die Schicht unter Umständen noch getrocknet bzw. nachbehandelt werden.

3.1.3. 3. Teilprozess: Nachbehandlung

Der Begriff **Nachbehandlung** wird in den meisten Fällen mit der Trocknung gleichgesetzt, aber in der Literatur nicht immer gleich verwendet. Ziel der Nachbehandlung ist im Allgemeinen, das verdruckte Fluid zu einer funktionsfähigen Schicht umzuwandeln bzw. die Leistung der Schicht zu optimieren. Es gibt mehrere Methoden zur Nachbehandlung von gedruckten Funktionsschichten. Dazu zählen Prozesse wie das Trocknen, das Sintern, das Aktivieren oder das Verdampfen von Rückständen.

Unter **Trocknen** wird im Allgemeinen das Ausdampfen des Lösemittels aus dem Funktionsfluid verstanden. Ziel ist es, nur das reine Funktionsmaterial auf dem

³⁶³ vgl. Koidis u. a. (2011).

Substrat zurück zu lassen. Dabei geht das flüssige Lösemittel in die Gasphase über. Dieser Vorgang wird von mehreren Größen beeinflusst: unter anderem von der Verdampfungstemperatur, dem Siedepunkt, dem Dampfdruck, der Temperatur und der Trocknungszeit.³⁶⁴ Die Anforderungen aus dem Device-Layout an die Schicht sind zum einen bestimmte Schichtdicken und zum anderen möglichst homogene Schichten zu erzeugen. Da direkt nach dem Auftragen des Fluids der Film noch sehr inhomogen ist, benötigt das Material einige Zeit, um sich „auszuleveln“. In dieser Zeit finden innerhalb der Schicht Diffusionsvorgänge statt.³⁶⁵ Beginnt die Trocknung zu schnell, ist die Zeit für die Schichtabscheidung zu kurz und die Schicht bleibt inhomogen. Somit lässt sich ableiten, dass die Trocknung zwar möglichst schnell sein soll, aber erst nach einer bestimmten Zeit beginnen darf. Die Dynamik der Filmbildung ist Gegenstand aktueller Forschung.

Sintern ist ein spanloses Fertigungsverfahren. Im Allgemeinen wird darunter das Zusammenfügen von pulverförmigen Werkstoffen verstanden. Dabei werden Halbzeuge durch Kompaktieren meist unter hohem Druck und bei Temperaturen von ca. 2/3 bis 3/4 der Schmelztemperatur hergestellt.³⁶⁶ Für die druckbare Elektronik ist dieses Verfahren interessant, da Nanopartikel bei niedrigen Temperaturen gesintert werden können. Durch den Oberflächeneffekt sinkt der Schmelzpunkt mit abnehmendem Partikelradius, was auch zu niedrigeren Sintertemperaturen führt.³⁶⁷ Zum Einsatz kommen hier in erster Linie Metalle wie Silber und Kupfer, die als Nanopartikel in Lösemittel dispergiert sind. Nach dem Auftragen der Schicht wird zunächst das Lösemittel aus der Schicht getrocknet. Daraufhin werden unter Einwirkung von hohen Temperaturen die Nanopartikel durch Sintern verbunden, damit diese eine leitfähige Schicht bilden. Neben dem Sintern mit hohen Temperaturen, besteht noch die Möglichkeit des photonischen Sinterns, bei dem die notwendige Energie über Strahlung eingebracht wird. So wurde gezeigt, dass mit Nah-Infrarot-Strahlung eine vergleichbare Leitfähigkeit erreicht werden kann wie bei Sintervorgängen in einem Ofen. Die Sinter-Zeit verkürzt sich dabei von 600 Sekunden auf 2 Sekunden.³⁶⁸ Die Energie kann auch über Lichtblitze³⁶⁹, Mikrowellen³⁷⁰ oder ei-

³⁶⁴ vgl. Galagan u. a. (2011).

³⁶⁵ vgl. Bornemann/Sauer/Dörsam (2011).

³⁶⁶ vgl. Schatt/Wieters/Kieback (2006).

³⁶⁷ vgl. Wronski (1967).

³⁶⁸ vgl. Cherrington u. a. (2011).

³⁶⁹ vgl. Hösel/Krebs (2012).

³⁷⁰ vgl. Perelaer/de Gans/Schubert (2006).

nem Laser eingebracht werden. Das sogenannte Laser-Sintern hat darüber hinaus den Vorteil, dass gezielt nur sehr kleine Strukturen gesintert werden können.³⁷¹

Das **Aktivieren** beschreibt in diesem Zusammenhang die Veränderung der Morphologie des verdruckten Materials durch Einbringung von Energie. Im Umfeld der druckbaren Elektronik wird häufig von Annealing gesprochen. Einige Materialien verändern ihre Eigenschaften unter Temperatureinwirkung. Halbleiter wie P3HT und PCBM ändern ihre Eigenschaften so, dass der Wirkungsgrad einer organischen Solarzelle auf Foliensubstrat um bis zu 120% steigt. Reyes-Reyes u. a. (2005) berichten von einem Optimum, welches bei drei Minuten und 155 °C erreicht wird. Die Temperatur kann nicht höher gewählt werden, da diese bereits nahe an der Schmelztemperatur des eingesetzten Foliensubstrats liegt.³⁷² Auf Glassubstraten wurde dieses Material bis kurz unter dessen Schmelztemperatur von 285 °C erhitzt. Dabei verändert sich die Morphologie, da das Material kristallisiert. Somit ist Annealing eine effektive Methode um die Morphologie anzupassen.³⁷³

Das **Verdampfen von Rückständen** beschreibt in diesem Zusammenhang das Entfernen von Rückständen durch Einwirkung von Wärme. Als Beispiel hierfür dienen der anorganische Leiter ITO oder der Halbleiter IZO³⁷⁴, die zunächst als Präkursor vorliegen. Dies ist ein gelöster Vorläuferstoff, in dem anorganische Partikel in organischen Lösemitteln gelöst werden. In dieser Lösung sind die Materialien druckbar. Nach dem Druckprozess wird Energie, meist in Form von Wärme, zugeführt. Dadurch wird die Lösung zersetzt. Das Lösemittel wird ausgetrieben und die organischen Partikel gehen eine chemische Bindung ein und es entsteht das gewünschte Material z.B. ITO oder IZO. Die Temperatur und die Prozessierungsdauer hängen von dem Material ab. Dabei sind Temperaturen von einigen hundert bis 1000°C und Prozessierungszeiten von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden möglich.³⁷⁵

Aus Prozesssicht ist es wünschenswert, dass der Teilprozess „Nachbehandlung“ so schnell wie möglich durchgeführt werden kann, damit dieser die vorgelagerten Prozessabläufe nicht durch Zwangspausen behindert. Vor allem die Aktivie-

³⁷¹ vgl. Ko u. a. (2007).

³⁷² vgl. Reyes-Reyes u. a. (2005).; Reyes-Reyes/Kim/Carroll (2005).

³⁷³ vgl. Zheng u. a. (2011).; Xiong/Liu (2012).

³⁷⁴ IZO ist Indium Zink Oxid

³⁷⁵ Beispiele von Prozessierung von anorganischen Materialien vgl. Hoffmann/Dilfer/Schneider (2011).; vgl. Schneider u. a. (2011).

nung und das Verdampfen von Rückständen werden je nach Material zum Teil bei hohen Temperaturen und relativ langer Zeit von bis zu einigen Minuten durchgeführt. Die Druck- bzw. Beschichtungsverfahren benötigen für die Beschichtung je nach Prozessgeschwindigkeit weniger als eine Sekunde. Somit müssten bei hohen Prozessgeschwindigkeiten sehr lange Trocknungsstrecken vorgesehen werden. Aus diesem produktionstechnischen Grund sollten Materialsysteme ausgewählt werden, die auch mit hohen Geschwindigkeiten prozessiert werden können. Zusätzlich ist zu beachten, dass bei der Durchführung der Nachbehandlungsschritte die darunter liegenden Schichten nicht beschädigt werden. Dies ist Gegenstand aktueller Forschung. Abb. 3.5 zeigt den Teilprozess der Nachbehandlung. Demnach muss nach jeder aufgetragenen Schicht ausgewählt werden, mit welchem Verfahren und welchen Parametern zur Nachbehandlung die Schicht optimiert werden kann. Als Output dieses Teilprozesses kommt ein Substrat mit einer optimierten bzw. funktionierenden Schicht heraus.

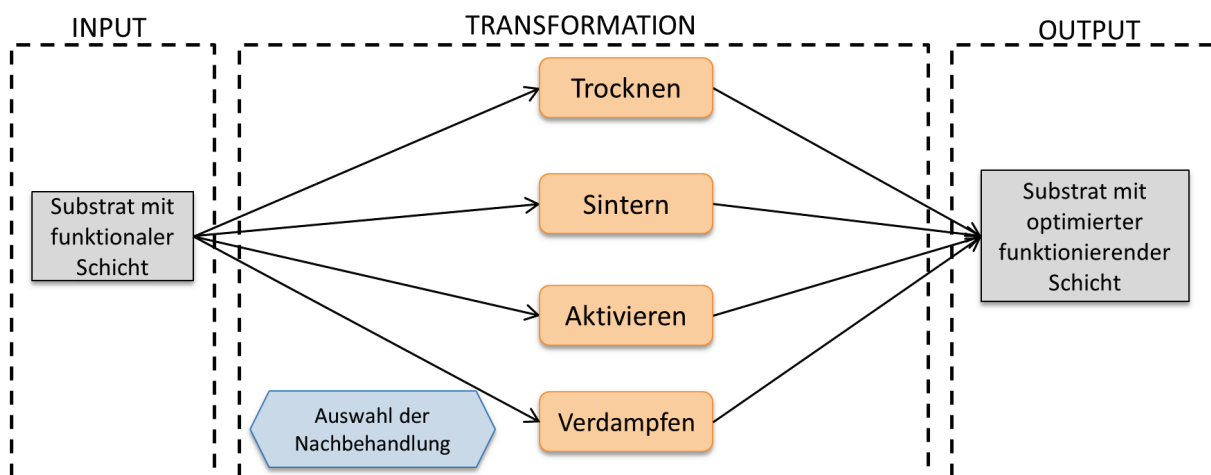


Abb. 3.5: Dritter Teilprozess: Nachbehandlung prozessierter Schichten
Quelle: In Anlehnung an Heßberger (2012)

3.1.4. 4. Teilprozess: Verkapselung

Die Anforderungen an organische Solarzellen bezüglich der Lebensdauer liegen für Low-Cost-Anwendungen bei ca. drei bis fünf Jahren. Die eingesetzten Materialien verändern ihre Eigenschaften über die Zeit, wenn sie den Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Die Funktion der Solarzelle wird durch diese Einflüsse beeinträchtigt, da unter anderem die Absorptionsfähigkeit und die Beweglichkeit der Ladungsträger sowie die Leitfähigkeit der Elektroden durch

Oxidation verringert werden. Abb. 3.6 zeigt den Vergleich zwischen einer verkapselten und einer unverkapselten Solarzelle. In dem Diagramm ist die Effizienz über die Zeit aufgetragen. Darin ist sehr deutlich zu erkennen, wie schnell die Effizienz der nicht verkapselten Solarzelle abnimmt.³⁷⁶ Um diese Alterungsvorgänge zu verhindern bzw. zu verzögern, müssen die Funktionsschichten von äußeren Einflüssen wie UV-Strahlung, Sauerstoff und Feuchtigkeit geschützt werden. Die Anforderungen sind hoch; die maximale Durchlässigkeit für Sauerstoff und Feuchtigkeit darf pro Tag nicht mehr als 10^{-6} bis 10^{-4} g/m² betragen.³⁷⁷

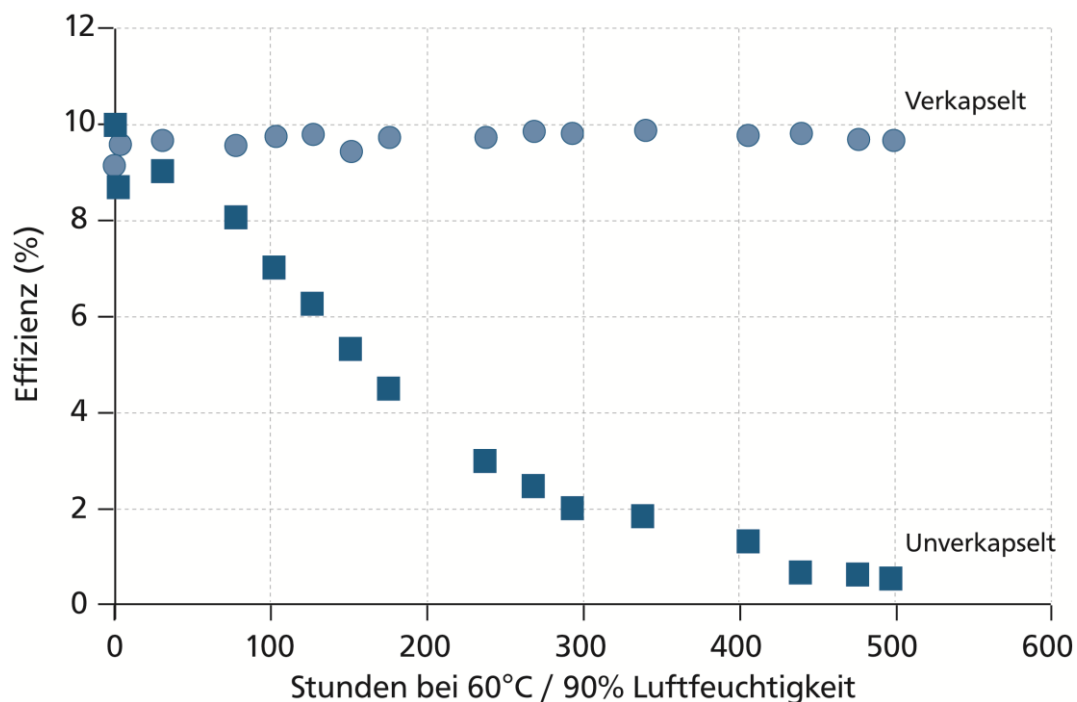


Abb. 3.6: Quantitativer Verlauf der Effizienz einer verkapselten und einer unverkapselten Solarzelle über die Zeit.

Quelle: In Anlehnung an Moro/Visser (2009)

Darüber hinaus könnten noch sogenannte Getter-Schichten mitaufgebracht werden, welche die Feuchtigkeit binden, bevor diese andere Schichten erreichen. Glas erfüllt die Anforderungen der maximalen Durchlässigkeit und wird daher häufig als Substrat und als obere Verkapselung eingesetzt. Mit Glassubstraten fallen allerdings viele Vorteile der organischen Photovoltaik wie geringes Gewicht und mechanische Flexibilität weg.³⁷⁸ Somit sind die Anforde-

³⁷⁶ vgl. Moro/Visser (2009).

³⁷⁷ vgl. Moro/Visser (2009).

³⁷⁸ Es gibt auch flexibles Glas, welches für die Verwendung für die druckbare Elektronik prinzipiell in Frage kommt. Das Glas ist nur einige Dutzend Mikrometer dick und ist somit flexibel. Dadurch ist es aber auch mechanisch weniger belastbar.

rungen an das Verkapselungsmaterial neben der Durchlässigkeit vor allem Transparenz, Flexibilität, geringes Gewicht, leichte Verarbeitbarkeit und günstige Anschaffung. Ziel ist es, die Verkapselung direkt in den Produktionsprozess zu integrieren. Aus heutiger Sicht eignen sich dazu zwei Verfahren. Zum einen kann eine weitere Folie als letzter Schritt auf die Solarzelle aufgeklebt werden, welche die notwendigen Eigenschaften erfüllt. Wichtig in diesem Falle ist, dass der verwendete Kleber auch die Kriterien der Barriere erfüllt, damit nicht seitlich über die Klebekanten Sauerstoff oder Feuchtigkeit eindringen kann. Zum anderen beschreiben die Autoren Moro und Visser die sogenannte Barix-Multilayer-Technologie. Diese sieht vor, dass mehrere Barrierschichten nacheinander aufgedampft werden, um den Diffusionsweg so lang wie möglich zu gestalten.³⁷⁹ Aus Produktionssicht wäre eine Alternative wünschenswert, womit die Barrierschichten direkt aus der Flüssigphase im Prozess mit gleicher Geschwindigkeit aufgebracht werden können.

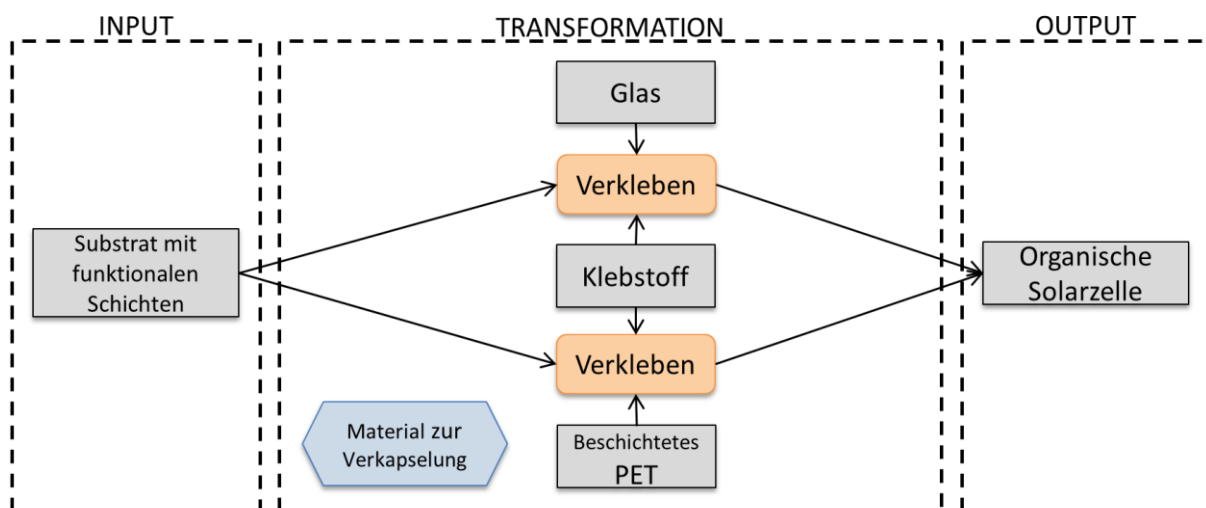


Abb. 3.7: Vierter Teilprozess: Verkapselung der OPV
Quelle: In Anlehnung an Heßberger (2012)

Abb. 3.7 zeigt den abschließenden Teilprozess, die Verkapselung der Solarzelle. Als Input ist hier das Substrat mit einer funktionierenden OPV-Zelle definiert. Zunächst muss entschieden werden, welches Verkapselungsverfahren angewendet werden soll und welche Materialien dafür eingesetzt werden sollen. Output dieses Teilprozesses ist eine funktionierende OPV-Zelle, welche vor Umwelteinflüssen durch die Verkapselung geschützt ist.

³⁷⁹ vgl. Moro/Visser (2009).

3.2. Herleitung und Identifikation kritischer Parameter

Soll ein Produkt der druckbaren Elektronik weiterentwickelt werden, genügt es nicht, isoliert das Material oder das Layout zu verbessern. Eine Änderung an einer bestimmten Stelle kann einen Einfluss an einer anderen Stelle haben. Daher müssen mehrere voneinander abhängige Variablen gleichzeitig optimiert werden.³⁸⁰ Dazu zählen das Device-Layout, das Material und dessen Formulierung sowie der dazugehörige Prozess (s. Abb. 3.1). Ein Beispiel dafür ist die Veränderung der Formulierung durch Änderung des Lösemittels oder durch Veränderung des Feststoffanteils. Beide Änderungen beeinflussen die Verdruckbarkeit erheblich, so dass unter Umständen andere Prozessparameter verwendet oder sogar andere Druckverfahren eingesetzt werden müssen. Abb. 3.8 zeigt ein Modell, wie eine Entwicklung ausgehend vom Material zu einem funktionierenden elektronischen Device aussehen könnte. Ziel hierbei ist es, einen Prozess für ein bereits existierendes Material zu finden. Darauf aufbauend wird ein aus mehreren Schichten bestehendes Device entwickelt.

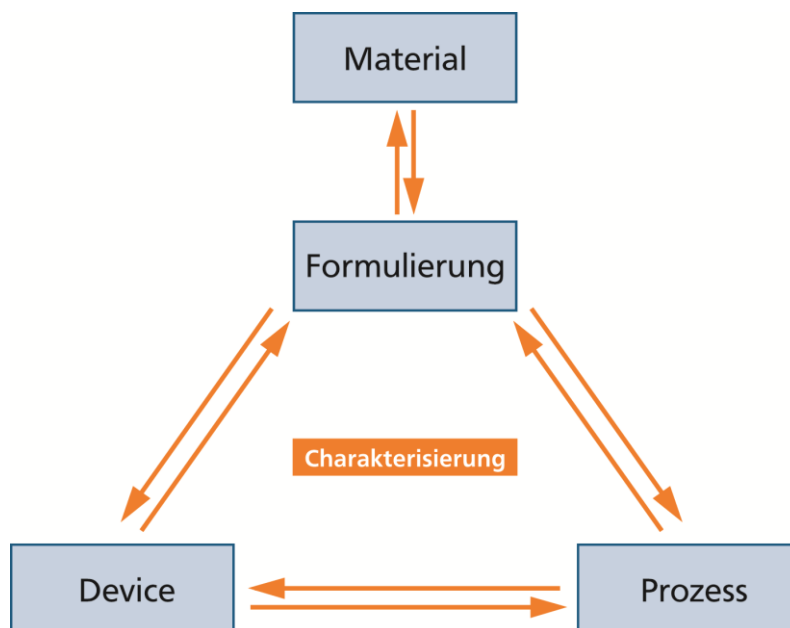


Abb. 3.8: Multi-Level-Ansatz zur Entwicklung von funktionalen Devices
Quelle: In Anlehnung an Dörsam (2010)

Der Entwicklungsprozess startet mit einem vorgegebenen Funktionsmaterial, welches in eine funktionierende Formulierung umgesetzt werden muss. Die

³⁸⁰ vgl. Dörsam (2010).

Formulierung steht allerdings mit dem Prozess und dem Device in gleichwertiger Wechselbeziehung. Wird beispielsweise die Geometrie des Devices verändert, hat dies auch Auswirkungen auf die eingesetzten Materialien und somit auch auf die Formulierungen. Darüber hinaus muss der Prozess an das neue Device-Layout und die neuen Formulierungen angepasst werden. Eine kleine Änderung einer Stelle des Multi-Level-Ansatzes kann Anpassungen an allen anderen Größen mit sich ziehen. Diese Betrachtung ist sehr technisch geprägt und sieht das Material als Ausgangspunkt. Das zu verkaufende Produkt selbst wird nicht in den Entwicklungsprozess mit einbezogen. Dies ist insofern zu erklären, da der größte Anteil an wissenschaftlicher und unternehmensbasierter Forschung in dem Umfeld der druckbaren Elektronik an Funktionsmaterialien stattfindet. Diese starke Fokussierung auf das Material ist in vielen Forschungsansätzen zu finden. Dieser ist in dem Bericht Nr. 6 der acatech zusammengefasst. Abb. 3.9 zeigt die Kette vom Material zum Produkt in der Forschung der organischen Elektronik. Die kreisförmige Darstellung zeigt den starken iterativen Charakter der Forschung und bezieht die Material-, Device- und Prozessentwicklung mit ein.³⁸¹

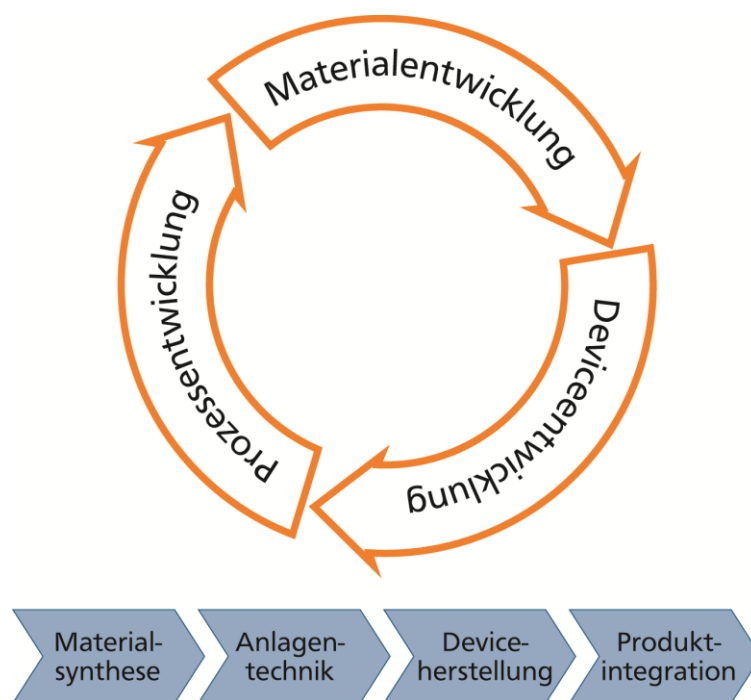


Abb. 3.9: Kette „vom Material zum Produkt“ in der Organischen Elektronik
Quelle: In Anlehnung an Schnell (2011)

³⁸¹ vgl. Schnell (2011).

Aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass die Größen Material, Formulierung und Device-Layout einen Einfluss auf die Auslegung einer Produktion von druckbarer Elektronik haben. Um allerdings marktfähige Produkte mit dieser Technologie produzieren zu können, müssen die Forschungsziele zusätzlich auf den Markt bzw. das Produkt ausgerichtet werden. Ein Ziel dieser Überlegung ist, die beiden scheinbar gegensätzlichen Aspekte, Produktumsetzung und forschungsgetriebene Technologieentwicklung, systematisch zu einem gemeinsamen Prozess zu bündeln. Dieser gemeinsame Prozess ist die Konzeption einer Fertigung. Jede Fertigung ist definitionsgemäß immer auf ein Fertigungsergebnis (das Produkt) ausgerichtet. Daher wird in dieser Arbeit das zu verkaufende Produkt an den Anfang der Betrachtung gerückt, und nicht die Mittel, wie das Fertigungsergebnis zu erreichen ist.

Auf Basis des Mehrstufen-Ansatzes aus Abb. 3.8 und Abb. 3.9, sowie der detaillierten Analyse des Fertigungsprozesses aus Kapitel 3.1 wird im folgenden Abschnitt eine Systematik entwickelt, welche die relevanten Einflussfaktoren zur Konzeption einer Produktion für die druckbare Elektronik darstellt. Hierfür sind fünf Ebenen notwendig, um die Einflussfaktoren auf die Produktion von druckbarer Elektronik zu beschreiben:

- 1) Definition des Produkts
- 2) Definition der Baugruppen
- 3) Definition des Devices
- 4) Definition der Materialien & Prozesse
- 5) Definition der Prozessparameter

Abb. 3.10 zeigt die Ebenen der Systematik, bei der das Produkt Ausgangspunkt der Betrachtung ist. Die Abbildung zeigt auch eine mögliche Reihenfolge der Entscheidungen, die getroffen werden müssen, wenn eine Produktion für ein Produkt der druckbaren Elektronik aufgebaut werden soll. Für jeden einzelnen Schritt ergibt sich jeweils eine Vielzahl möglicher Lösungsansätze, unter denen ausgewählt werden kann bzw. muss.

In der **ersten Ebene** „Definition des Produkts“ wird das herzustellende Endprodukt festgelegt. Nach DIN 6789 ist für ein physisches Produkt auch das Wort Erzeugnis oder Enderzeugnis gebräuchlich: "Erzeugnisse sind in sich geschlossene, aus einer Anzahl von Gruppen und/oder Teilen bestehende funktionsfä-

hige Gegenstände (z. B. Maschinen, Geräte) als Fertigungs-Endergebnisse".³⁸² In der DIN 199 ist „ein Erzeugnis ... ein durch Fertigung entstandener gebrauchsfähiger bzw. verkaufsfähiger Gegenstand.“³⁸³ Produkte mit Teilen der druckbaren Elektronik sind beispielsweise eine OLED-Schreibtischlampe oder ein OPV-Handyladegerät.

Ausgehend von diesem Produkt wird in der **zweiten Ebene** „Definition der Baugruppen“ festgelegt, welche Baugruppen miteinander kombiniert werden müssen, um die Funktion des Produkts sicherzustellen. Dazu sind Bauteile notwendig wie z.B. Gehäuse, Bedien-Elemente oder Energiespeicher. In diesem Schritt wird somit auch festgelegt, welches Bauteil durch die druckbare Elektronik realisiert werden soll. Für das Beispiel des OPV-Handyladegeräts sind neben der OPV-Zelle ein Gehäuse, evtl. eine Pufferbatterie sowie die Verkabelung notwendig. In dieser Arbeit wird nur das Bauteil näher betrachtet, welches durch die druckbare Elektronik realisiert werden kann. Dieses Bauteil wird als Device bezeichnet. So definiert Schnell (2011): „Produkte stellen die Integration des Device in eine endnutzertaugliche Umgebung dar.“³⁸⁴

In der **dritten Ebene** „Definition des Devices“ werden, ausgehend von den Anforderungen des Produkts und den aktuellen technischen Möglichkeiten, die Merkmale des Devices festgelegt. Diese bestimmen das Device-Layout, die zu verwendenden Funktionsmaterialien, das Substrat sowie weitere Parameter. Für das Device-Layout müssen beispielsweise der Schichtaufbau oder die geometrische Struktur definiert werden. Da für ein Device mehrere Schichten zur Funktion benötigt werden³⁸⁵, kommen folglich mehrere Funktionsmaterialien zum Einsatz. Wie in Abb. 3.10 dargestellt ist, erweitern die unterschiedlichen Baugruppen und die Materialien für den Schichtstapel den Entscheidungsbaum in die dritte Dimension. Diese Darstellung zeigt die Komplexität des Entscheidungsproblems, in dem eine optimale Lösung für die Fertigung eines Produkts gefunden werden muss. Darüber hinaus muss aus den Anforderungen des Produkts ein Substrat bestimmt werden.

³⁸² Deutsches Institut für Normung (1965).

³⁸³ Dangelmaier (2009).

³⁸⁴ Schnell (2011).

³⁸⁵ Für den Aufbau der verschiedenen Devices s. Kapitel 2.1

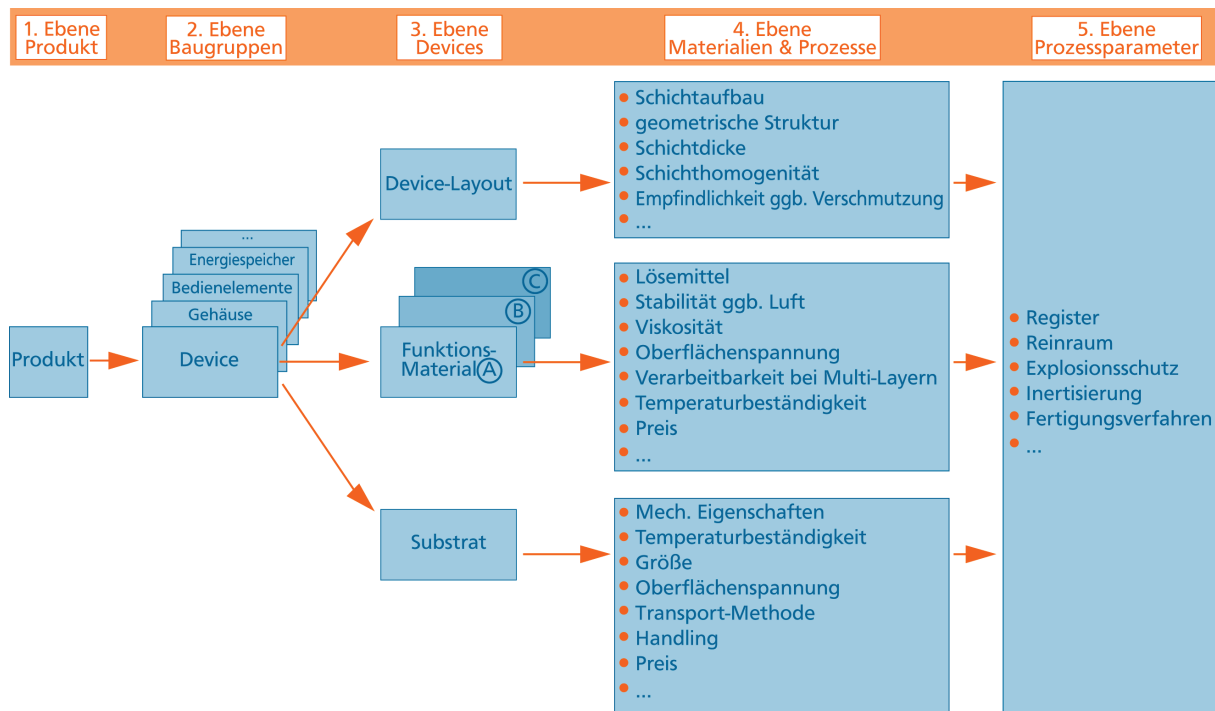


Abb. 3.10: Klassifikation der Einflussparameter für die Produktion von druckbarer Elektronik

In der **vierten Ebene** „Definition der Materialien & Prozesse“ werden die Details für das Device-Layout, die Funktionsmaterialien und das Substrat festgelegt. Aus diesen Parametern lässt sich der notwendige Prozess zur Herstellung des Devices herleiten. Der in Abb. 3.8 dargestellte Multi-Level-Ansatz zur Entwicklung von funktionalen Devices zeigt die Zusammenhänge der Parameter Device, Material und Prozess.

In der **fünften Ebene** „Definition weiterer Prozessparameter“ werden weitere Details festgelegt, die sich aus mehreren, im vierten Schritt definierten, Parametern ergeben. Beispielsweise wird die Auswahl eines Fertigungsverfahrens von mehreren Parametern wie den Materialien, dem Substrat und dem Device-Layout bestimmt. In den folgenden Abschnitten werden die in Abb. 3.10 dargestellten Einflussparameter beschrieben und kategorisiert.

3.2.1. Parameter des Device-Layouts

Für das Device-Layout müssen Eigenschaften wie Schichtaufbau, geometrische Struktur, Schichtdicke und Schichthomogenität sowie die Empfindlichkeit des Devices gegenüber Verschmutzung festgelegt werden. Der **Schichtaufbau** ist

die Reihenfolge, in der die Funktionsmaterialien auf das Substrat aufgebracht werden, und sie bestimmt die Funktion des Bauteils.³⁸⁶ Somit bestimmt der Schichtaufbau die Reihenfolge der Einzelprozesse im Produktionsprozess. Die **geometrische Struktur** der Einzelschichten und der Schichten zueinander bestimmt zum großen Teil die Funktion des Devices. Während bei OPV und OLED in erster Linie Vollflächen hergestellt werden müssen, hat die geometrische Struktur bei Transistoren einen sehr großen Einfluss auf die Leistung. Dieser Parameter beeinflusst die Wahl des Produktionsverfahrens und auf den Substrattransport, da die Lage der Schichten zueinander stark die Anforderungen an das Register bestimmt. Die **Schichtdicke**³⁸⁷ bestimmt bei allen Devices erheblich die Funktion und Leistung des Bauteils und hat zum Teil Einfluss auf die Produktionsverfahren sowie die einzustellenden Maschinenparameter. Gleiches gilt auch für die **Schichthomogenität**.³⁸⁸ Diese beeinflusst vor allem die Qualität des Devices. Daher bestimmt die Schichthomogenität die Auswahl des geeigneten Produktionsverfahrens und die einzustellenden Maschinenparameter.

3.2.2. Parameter der Funktionsfluide

Die Auswahl der Funktionsfluide wird von dem Device-Layout und den Anforderungen des Produkts bestimmt. Wichtig dabei ist, dass die Funktionsfluide nicht isoliert voneinander selektiert werden können, da diese zum einen nur in Kombination die gewünschte Funktion erzeugen und zum anderen sich gegenseitig in der Verarbeitbarkeit beeinflussen. Die Materialien müssen aus Produktionssicht wie folgt charakterisiert werden: Prozessierbarkeit, Viskosität, Oberflächenenergie, Verarbeitbarkeit bei Multi-Layer, Temperaturbeständigkeit, Lösemittel, Stabilität gegenüber Luft, Verfügbarkeit sowie Preis. Nachfolgend werden einige Parameter näher erläutert.

Die **Prozessierbarkeit** ist die Eignung eines Materials mit bestimmten Verfahren verarbeitet werden zu können. Prozessierbarkeit und Funktionalität stehen dabei häufig im Widerspruch zueinander. Beispiele hierfür sind die Verwendung bestimmter Lösemittel oder der Feststoffanteil in einer Lösung. So eignen sich bestimmte Lösemittel besser, die Funktion zu optimieren, während andere wiederum deutlich stärker zu einer guten Prozessierbarkeit beitragen. Bezüg-

³⁸⁶ vgl. Kapitel 2.1

³⁸⁷ vgl. Kapitel 2.2.2

³⁸⁸ vgl. Kapitel 2.2.2

lich des Feststoffanteils führt eine höhere molare Masse leitfähiger Polymere tendenziell zu einer besseren Leitfähigkeit der gedruckten Schicht, während sich die Löslichkeit und somit die Verarbeitbarkeit eher verschlechtert. Im graphischen Druck werden häufig Additive zur Verbesserung der Prozessierbarkeit eingesetzt, welche allerdings häufig die Funktion der Funktionsmaterialien beeinträchtigen.

Für die Prozessierung der Materialien sind die Eigenschaften der Formulierung wie **Viskosität**, **Oberflächenenergie** und Feststoffgehalt wichtig. Diese bestimmen zusammen mit anderen Parametern des Substrats die Auswahl des zu verwendenden Produktionsverfahrens.

Die **Verarbeitbarkeit bei Multi-Layer** beschreibt die Eignung der Materialsysteme, nicht nur als Einzelschicht, sondern als Schichtverbund verarbeitet werden zu können. Dabei spielt die Benetzung, die Haftung sowie der Nachbearbeitungsprozess eine Rolle. So ist beispielsweise denkbar, dass das Lösemittel aus der zweiten Schicht das Material der ersten Schicht wieder anlöst und es zu einer Vermischung der beiden Materialien kommt. Dies hat negative Einflüsse auf die Leistung der Devices.

Das eingesetzte **Lösemittel** bestimmt aus Produktionssicht zum einen die Auswahl des Produktionsverfahrens bzw. die Beschaffenheit der Produktionseinheiten. Zum anderen bestimmt das Lösemittel, ob die Anlage mit Explosions-Schutz-Mechanismen versehen werden muss.

Die **Stabilität** der Funktionsmaterialien **gegenüber Luft** bestimmt die Anforderungen an eine Inertisierung³⁸⁹, damit ggf. empfindliche Materialien nicht mit Sauerstoff oder Wasser in Berührung kommen.

Der **Preis** der Materialien beeinflusst die Auslegung einer Produktionsanlage. Die aktuell erhältlichen Funktionsmaterialien wie Halbleiter oder Isolatoren sind im Vergleich zu den üblichen Materialien in der Druck- oder Coatingbranche sehr teuer. Daher kann es unter Umständen sinnvoll sein, einen großen Aufwand für die Optimierung der Produktionsanlage bezüglich des Materialverbrauchs zu betreiben.

3.2.3. Parameter der Substrate

Aus heutiger Sicht kommen für die druckbare Elektronik vor allem Glas und Folien als Substrate in Frage. In Zukunft sind auch andere Substrate wie Papier

³⁸⁹ Inertisierung bezeichnet den Vorgang, Luftsauerstoff oder reaktions- bzw. explosionsfähige Gase bzw. Gasgemische durch Zugabe von inerten Gasen oder Dämpfen aus Räumen zu verdrängen.

oder Formteile³⁹⁰ denkbar. Die Substrate müssen aus Produktionssicht mit folgenden Eigenschaften beschrieben werden: mechanische Eigenschaften, Temperaturbeständigkeit, Oberflächenenergie und Größe. Auch die Art des Substrattransports hat einen Einfluss.

Die **mechanischen Eigenschaften** wie Biegesteifigkeit, Dehnung, Bruchfestigkeit bzw. Reißfestigkeit³⁹¹ bestimmen neben den verwendeten Fertigungsverfahren vor allem den Einsatz der Transportmethode.

Die **Temperaturbeständigkeit** des Substrats bestimmt die maximale Temperatur in der Trocknung einer Anlage. Das beeinflusst die Zeit, die eine Schicht zum Trocknen benötigt, wovon wiederum die Trocknungsstrecke in einer Produktionsanlage abhängt.

Die **Oberflächenenergie** hat Einfluss unter anderem auf die Auswahl des Produktionsverfahrens und zusammen mit den Materialeigenschaften auf die Schichtbildung. So ist es denkbar, dass bei zu niedriger Oberflächenenergie des Substrates ein Zwischenprozess integriert werden muss, der diese Oberflächenenergie erhöht.

Die **Größe** des Substrats bestimmt direkt die Maße der Produktionsanlage. Die Breite des Substrats bedingt die Arbeitsbreite der Produktionsanlage und somit die Arbeitsbreite der Fertigungsverfahren und Transporteinrichtung. Werden konventionelle Druckverfahren eingesetzt, korreliert die Substratbreite mit der Breite der Zylinder. Die Länge des Substrats bezieht sich in erster Linie auf Bogensubstrate und bestimmt den Durchmesser der Druckzylinder. Bei einem Transport über ein Shuttle-System³⁹² ergeben sich aus den Maßen des Substrats auch die Maße des Substratträgers.

Die **Transportmethode** beeinflusst maßgeblich die konkrete Ausgestaltung der Produktionsanlage. So ist offensichtlich, dass eine Produktionsanlage mit Rollensubstrattransport sich deutlich von einer Anlage mit Shuttletransport unterscheidet.

Das **Handling** fasst den Umgang mit dem noch zu bedruckenden oder bereits bedruckten Substrat in der Fertigung zusammen. Dabei müssen Fragen geklärt werden, ob bereits bedruckte Substrate gestapelt bzw. aufgerollt, oder wie häufig bedruckte Substrate auf- und abgerollt werden können.

³⁹⁰ Formteile sind beliebig geformte Werkstücke, die direkt bedruckt werden können. Beispiele aus dem graphischen Druck sind Parfüm-Flacons oder Stifte.

³⁹¹ Dahinter stehen die folgenden Werkstoffkennwerte E-Modul, G-Modul sowie Festigkeitswerte wie Zugfestigkeit

³⁹² Das Thema Substrattransport wird in Kapitel 4.3 im Detail beschrieben.

3.2.4. Sonstige Parameter

Die Möglichkeiten der **Qualitäts- und Prozessüberwachung** kann die Auslegung einer Fertigung beeinflussen. Die dafür notwendigen Messmittel können besondere Umgebungsbedingungen (Reinheit, keine Schwingungen) erfordern und die Messgeschwindigkeit kann die Produktionsgeschwindigkeit beeinflussen.

Die Auslegung einer Produktion wird auch durch die **Empfindlichkeit** der Schichten **gegenüber Verschmutzung** durch Staub beeinflusst. So muss gegebenenfalls die Kontamination durch Staub mit einem aufwendigen Reinraum verringert werden.

Bei der Auslegung der Produktion spielen vor allem die folgenden **vorgegebenen Leistungskennzahlen** eine Rolle: **Gutmenge** und **produzierende Menge**.

An der zu produzierenden Menge bemisst sich die Kapazität der Anlage. Die Gutmenge³⁹³ bestimmt zusammen mit der zu produzierenden Menge die Kapazität der Anlage.

Um aus den Einzelprozessen eine wirtschaftliche Produktion zu machen, bedarf es der **Anordnung** der einzelnen Bearbeitungsstationen hin zu einem optimierten Produktionssystem.

3.2.5. Zusammenfassung und Bewertung der kritischen Parameter

Die in den letzten Abschnitten beschriebenen Parameter sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Um diese Parameter nun näher untersuchen zu können, gilt es eine Vorauswahl aus den Parametern zu treffen. Die Parameter werden zunächst nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet. Für die technische Bewertung wird ermittelt, wie groß deren Einfluss auf die Auslegung einer Fertigung von druckbarer Elektronik ist, bzw. wie sehr der Parameter eine mögliche Produktionsanlage verändert. Darüber hinaus sollten die Parameter auf ihre Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit einer solchen Produktionsanlage untersucht werden. Da bisher noch kein Markt für Produkte existiert, kann eine Wirtschaftlichkeitsanalyse nicht anhand von gemessenen Daten durchgeführt werden.

³⁹³ Im Englischen als Yield bezeichnet. In der Druckindustrie ist der Begriff der Ausbeute üblich.

Tabelle 3.2: Bewertung der kritischen Parameter für die Konzeption einer Produktion für die druckbare Elektronik

3. Ebene "Def. des Devices"	4. Ebene "Def. der Materialien & Prozesse"	5. Ebene "Def. der Prozessparameter"	Wertung technisch
Device-Layout			
	Schichtaufbau geometrische Struktur	Register	+
	Schichtdicke		+
	Schichthomogenität		o
	Empfindlichkeit ggb. Verschmutzung		o
		Reinraum	+
Funktionsfluid			
	Viskosität	Fertigungsverfahren	o
	Oberflächenspannung		o
	Lösemittel		+
	Stabilität ggb. Luft	Explosionsschutz	+
		Inertisierung	+
	Verarbeitbarkeit bei Multi-Layer		o
	Temperaturbeständigkeit		o
	Preis		+
Substrat			
	mech. Eigenschaften		+
	Temperaturbeständigkeit		+
	Größe		o
	Oberflächenspannung		o
	Transport-Methode		+
	Handling		+
	Preis		-
Sonstiges			
	Charakterisierung	Qualitätssicherung	+
	Anordnung der Bearbeitungsstationen		+
	Leistungskennzahlen		+
		Fertigungsmenge	+
		Gutmenge	+
+ großer Einfluss o durchschnittlicher Einfluss - geringer Einfluss			

3.3. Technische und wirtschaftliche Analyse der kritischen Parameter

In dem folgenden Abschnitt werden die in Kapitel 3.2 hergeleiteten kritischen Parameter näher untersucht. Eine weitergehende Analyse wird nur bei den Parametern durchgeführt, die einen großen Einfluss auf die Auslegung einer Produktion haben und somit in Tabelle 3.2 mit einem „+“ bewertet wurden. Auf eine detaillierte Betrachtung der Faktoren, die wenig oder nur einen durchschnittlichen Einfluss haben, wird hier verzichtet.

Nach der technischen und wirtschaftlichen Betrachtung der ausgewählten Parameter werden Hypothesen aus der Analyse abgeleitet. Diese basieren vor allem auf der wirtschaftlichen Analyse, da der Handlungsspielraum in technischen Fragen noch sehr gering ist. Grund hierfür ist der Schwerpunkt der Literatur und Forschung auf Laborebene. In Zukunft wird sich das mit zunehmender Anzahl an technischen Alternativen verändern.

3.3.1. Untersuchung der Einflussfaktoren des Device-Layouts

Der **Schichtaufbau** eines Devices bestimmt das Layout einer Produktionsanlage von druckbarer Elektronik, da die Anzahl der Schichten die Anzahl der Prozessschritte bestimmt.³⁹⁴ Somit beeinflusst der Schichtaufbau auch die Anzahl der einzusetzenden Bearbeitungsstationen. Können für einige Schichten die gleichen Fertigungsverfahren eingesetzt werden, können u. U. Bearbeitungsstationen für mehrere Prozessschritte eingesetzt werden. Dies hat aber wiederum großen Einfluss auf den Durchsatz der gesamten Produktionsanlage.³⁹⁵ Darüber hinaus beeinflusst der Schichtaufbau auch die Reihenfolge der Prozessschritte, da die Reihenfolge der Schichten fest vorgegeben ist. Eine Veränderung der Reihenfolge der Prozessschritte ist nicht möglich. Die Reihenfolge kann nur geändert werden, indem das Device-Layout angepasst wird.

Der Schichtaufbau hat einen großen Einfluss auf die **Wirtschaftlichkeit** einer Produktion. Bei Erhöhung der Anzahl der Schichten steigen die Kosten. So müssen zum einen mehr Produktionsverfahren und ggf. auch mehr Trocknungseinheiten in die Anlage integriert werden, welche die Investitionssumme für die Produktionsanlage erhöhen. Zum anderen werden mit mehr Schichten

³⁹⁴ Eine Ausnahme bildet das Multi-Layer-Coating, bei dem mehrere Funktionsfluide gleichzeitig in einem Prozessschritt aufgebracht werden können.

³⁹⁵ vgl. Kapitel 4.4.

auch mehr Funktionsfluide benötigt. Da diese aktuell sehr teuer sind, beeinflusst der Mehrverbrauch der Fluide auch die Materialkosten erheblich. Darüber hinaus steigen auch die Betriebskosten, da mit einer größeren Anlage die Wartungskosten, die Energiekosten sowie Personalkosten steigen. Die Anzahl der Schichten hat auch einen Einfluss auf den Ertrag. Dieser Einfluss ist nur indirekt ableitbar. So ist davon auszugehen, dass eine Erhöhung der Anzahl der Schichten nur dann in Betracht gezogen wird, wenn sich die Leistung des Devices verbessert. Daher ist denkbar, dass die Effizienz oder andere Parameter positiv beeinflusst werden, so dass der Marktpreis gegenüber dem weniger leistungsfähigen Produkt höher sein wird. Ob sich eine Erhöhung der Schichtanzahl positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt, kann nur an einem realen Produkt bestimmt werden.

Als **Hypothese** lässt sich festhalten, dass eine zusätzliche Funktionsschicht nur dann hinzugefügt werden sollte, wenn der zusätzliche Erlös aus dem aufwendigeren Produkt die Summe der Mehrkosten aus Investitionskosten und Betriebskosten, innerhalb eines definierten Zeitrahmens übersteigt.

Die **geometrische Struktur** kann zum einen für jede Einzelschicht und zum anderen für die Schichten zueinander beschrieben werden. Die geometrische Struktur einer einzelnen Schicht beschreibt die Größe und Position der zu druckenden Schicht auf dem Substrat. Die geometrische Struktur einer Einzelschicht nimmt Einfluss auf die Auswahl des Produktionsverfahrens, da bei großen Flächen oder sehr dünnen Linien u. U. unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen. Für sehr feine Linien eignet sich zum Beispiel das Tiefdruckverfahren, während bei großen Flächen häufig das Slot Die Coatingverfahren³⁹⁶ zum Einsatz kommt. Die geometrische Struktur der Schichten zueinander beeinflusst das Design einer Anlage erheblich, da es die Anforderungen an das Register definiert. Bei hohen Anforderungen an das Register, wie es beispielsweise bei OFET-Anwendungen der Fall ist,³⁹⁷ hat dies einen direkten Einfluss auf die Substrattransportmethode und die Konstruktion der Produktionsanlage. So sind bei heutigen Druckmaschinen die Registerabweichungen bei einem Rollensubstrattransport tendenziell höher, als bei einem Bogentransport über Greifersysteme. Wurde bereits eine Substrattransportmethode festgelegt, bestim-

³⁹⁶ vgl. Kapitel 2.2.1

³⁹⁷ vgl. Kapitel 2.1.3

men die Anforderungen an das Register die Konstruktion der Anlage, da bei hohen Anforderungen z. B. die Maschinen deutlich steifer und schwingungsärmer ausgelegt werden müssen.³⁹⁸

Aus **wirtschaftlicher Sicht** beeinflusst die geometrische Struktur die Kosten einer Produktionsanlage, da diese die Auswahl der Fertigungsverfahren mitbestimmt. Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf das Design der Produktionsanlage wird in Kapitel 4.2.2 näher untersucht. Auch das einzuhaltende Register bestimmt die Kosten einer Produktionsanlage, da der technische Aufwand für eine sehr geringe Registerabweichung sehr hoch ist. So muss die Anlage deutlich steifer ausgelegt werden und der Regelaufwand wird deutlich höher, was implizit die Kosten erhöht. Darüber hinaus müssen deutlich präzisere Antriebe und Getriebe eingebaut werden. Auch der Entwicklungsaufwand zur Schwingungsoptimierung sowie zur Optimierung der Regelung der Maschine tragen zu deutlichen Mehrkosten bei. Die Ertragsseite ist nur schwer zu untersuchen. Während die Anforderungen von OPV und OLED an das Register nicht sehr hoch sind, beeinflusst das Register die Leistung von gedruckten elektronischen Schaltungen sehr stark.³⁹⁹ Somit ist davon auszugehen, dass bei einer Reduzierung der Registerabweichungen der Ertrag für mögliche Produkte steigen wird. Als Nebeneffekt von geringen Registerabweichungen verkleinern sich bei Schaltungen die zu bedruckenden Flächen, da bei gleicher Funktionsfläche die Einzelflächen aufgrund der geringeren Toleranzen kleiner gedruckt werden können. Dadurch können Funktionsfluide und Substrat eingespart werden.

Eine **Hypothese** lässt sich in diesem Falle nur abhängig von dem zu produzierenden Device geben. So sind bei OLED und OPV wenige Verbesserungen durch extrem feine Linien oder sehr kleine Registerabweichungen zu erwarten. Folglich wird bei diesen Devices von solchen kostentreibenden Maßnahmen abgeraten, so lange das eingesparte Material und die möglichen höheren Erlöse nicht die Mehrkosten der Anlage nach einer definierten Zeit übersteigen. Bei Anwendungen mit Transistoren verändert sich hingegen die Leistung des Produkts deutlich mit feineren Linien und reduzierten Registerabweichungen. Daher ist auch ein höherer Preis des Produkts zu erwarten, so dass bei diesen Produkten gilt, das Optimum aus Ertrag und Kosten über einen definierten Zeitraum zu finden.

³⁹⁸ vgl. Schüttler (2011).

³⁹⁹ vgl. Kapitel 2.1.3

3.3.2. Untersuchung der Einflussfaktoren des Funktionsfluids

Da das Funktionsmaterial mit **Lösemittel** verflüssigt werden muss, beeinflusst das Lösemittel zum einen die Auswahl des Fertigungsverfahrens und zum anderen die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen der Anlage. Die Viskosität ist ein wichtiger Parameter bei der Auswahl des zu verwendenden Fertigungsverfahrens, da die Verfahren nur mit Fluiden eines bestimmten Viskositätsbereichs optimale Ergebnisse erzielen. Ferner beeinflusst das Lösemittel auch die zu treffenden Sicherheitsvorkehrungen einer Produktionsanlage. Kommen heute in der Druckindustrie meist nur noch ungefährliche Lösemittel zum Einsatz⁴⁰⁰, sind die aktuell in der druckbaren Elektronik verwendeten Lösemittel deutlich schwieriger in der Handhabung. Viele der heute verwendeten Lösemittel wie Toluol, Aceton und Ethanol sind leicht flüchtig.⁴⁰¹ Einige der eingesetzten Lösemittel haben einen niedrigen Flammpunkt. Dadurch ergibt sich unter gewöhnlichen Produktionsbedingungen, mit vielen potentiellen Zündquellen,⁴⁰² ein Explosionsrisiko. In solchen Fällen muss die Anlage mit geeigneten Mitteln gegen diese Gefahren geschützt werden. Die Anlage wird hierfür einer Gefahrenanalyse unterzogen und die einzelnen Bereiche in Gefahrenzonen unterteilt. Für die jeweiligen Gefahrenzonen müssen dann geeignete Schutzmaßnahmen, wie Arbeitsanweisungen oder technische Lösungen, getroffen werden. Neben den Gefahren aus der Brand- und Explosionsgefahr der Lösemittel ist auch das Gesundheitsrisiko des Lösemittels zu beachten. Auch die Gefahr für die Umwelt gilt es zu überprüfen.

In manchen Fällen wird eine Lösemittelatmosphäre nicht nur negativ angesehen, sondern ganz gezielt eingesetzt, um das Verdrucken von Funktionsfluiden zu beeinflussen. Der Vorteil ist zum einen, dass in einer gesättigten Atmosphäre kaum noch Lösemittel aus dem Fluidvorrat verdunsten kann. Somit verändert sich die Viskosität über die Zeit nur wenig und die Druckbedingungen bleiben gleich. Zum anderen verdunstet kaum Lösemittel aus der gedruckten Schicht, so dass die meist noch sehr inhomogene Schicht mehr Zeit zur Schichtabscheidung hat, bis das Lösemittel ausgedampft ist und die Schicht fest wird.⁴⁰³ Der

⁴⁰⁰ Eine Ausnahme bildet vor allem die Verwendung von Toluol in Tiefdruckmaschinen. Da dort große Mengen verarbeitet werden, wird das Lösemittel aus den gekapselten Druckwerken abgesaugt und in einer Rückgewinnungsanlage erneut verflüssigt, gesammelt und weiterverkauft.

⁴⁰¹ Leicht flüchtig mit Verdunstungszahl kleiner 10 (Toluol 6,1 und Aceton 2,1 Ethanol 8,3). Aceton und MEK sind Niedrigsieder.

⁴⁰² Beispiele sind hohe Temperaturen durch elektrische Antriebe und Trockner, Reibung, statische Aufladung oder allgemeine Potentialunterschiede.

⁴⁰³ vgl. Thieme/Jürgen Willmann (2012).; vgl. Bornemann/Sauer/Dörsam (2011).

Aufwand zum Schutz der Anlage vor Explosionen ist auch in dieser Situation sehr groß.

Aus **wirtschaftlicher Sicht** beeinflusst das Lösemittel vor allem die Kosten der Produktionsanlage. Zum einen über das einzusetzende Fertigungsverfahren und zum anderen über die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen für die Gesundheit der Mitarbeiter sowie von Schutzmaßnahmen gegen Brände und Explosionen. Da Schutzmaßnahmen sehr aufwendig sind, verteuern sie eine Produktionsanlage erheblich. Zum einen dürfen nur noch zertifizierte Zukaufteile eingesetzt werden, die den Explosions-Schutzbestimmungen entsprechen, und zum anderen müssen alle Gefahrenstellen mit Zündquellen mit technischen Maßnahmen verhindert werden. Die Produktionsanlage muss durch geeignete Institute überprüft und zertifiziert werden. Auch der Preis des Lösemittels beeinflusst die Wirtschaftlichkeit, indem die variablen Kosten mit dem Preis des Lösemittels steigen oder sinken. Materialkosten können beispielsweise durch eine Rückgewinnung der verdampfenden Lösemittel eingespart werden. So werden in der graphischen Industrie beim Lösemitteltiefdruck die Lösemittel nahezu vollständig wieder zurück gewonnen. Auch aus Gründen des Ansehens eines Unternehmens gilt es heute, gefährliche und vor allem gesundheits- und umweltgefährdende Substanzen zu vermeiden. Auf der Ertragsseite ändert der Einsatz verschiedener Lösemittel nur wenig. Relevant wird dies, wenn das Funktionsmaterial nur mit einem bestimmten Lösemittel zu einer Formulierung zu verarbeiten ist. Dann entscheidet das Lösemittel über die Funktion des Devices und somit, ob überhaupt ein Ertrag möglich ist.

In Bezug auf Lösemittel lautet die **Hypothese**, möglichst auf Lösemittel zu verzichten, die teure Schutzmaßnahmen an der Produktionsanlage erforderlich machen. Sollte dies mangels Alternativen⁴⁰⁴ nicht möglich sein, müssen die Mehrkosten aus Investitions- und Betriebskosten dem Ertrag gegenüber gestellt werden.

Im frühen Stadium gilt es, das jeweilige Sicherheitsdatenblatt zu analysieren und die möglichen Konzentrationen in der Produktionsanlage abzuschätzen. Auch die Kosten für technische Schutzmaßnahmen sollten möglichst früh abgeschätzt werden.

⁴⁰⁴ In dem aktuellen Stadium der Entwicklung der Materialien kann es durchaus vorkommen, dass sich bestimmte Funktionsmaterialien nur mit, hinsichtlich der Gefährdung, problematischen Lösemitteln zu einer Formulierung verarbeiten lassen. In diesem Falle steht die Funktion über dieser Hypothese.

Empfindlichkeit gegenüber Luft

Einige Funktionsfluide sind gegenüber Luft bzw. Sauerstoff und Feuchtigkeit empfindlich. Bei Kontakt mit Sauerstoff kommt es zu einer Oxidation des Materials.⁴⁰⁵ Wassereinlagerungen haben beispielsweise einen großen Effekt bei OFETs auf Basis von Pentacen. Bei einer relativen Feuchte in der Atmosphäre von 70-80% verringert sich der Drain-Strom um bis zu einer Größenordnung gegenüber einer trockenen Atmosphäre. Dies kann u. a. mit der Verringerung der Feldeffektbeweglichkeit durch Streuung der Ladungsträger erklärt werden.⁴⁰⁶ Für die Fertigung ist relevant, wie empfindlich die Funktionsfluide gegenüber Luft sind. Weniger empfindliche Funktionsfluide können beispielsweise unter normalen Bedingungen verarbeitet werden. Bei diesen Funktionsfluiden genügt es meist, die Zeit, in der das Fluid der Atmosphäre ausgesetzt ist, möglichst kurz zu halten. Das ist allerdings nur möglich, wenn das Funktionsfluid im Vorratsbehälter vor der Atmosphäre geschützt wird und die Zeit nach dem Beschichten bis zur nächsten Schicht möglichst kurz gehalten wird. Zusätzlich müssen diese Devices verkapselt werden, um deren Haltbarkeit zu verlängern. Dies bedeutet einen extra Prozessschritt in dem Produktionssystem. Bei der Verarbeitung von sehr empfindlichen Funktionsfluiden, muss bereits bei der Verarbeitung Sauerstoff und Feuchtigkeit ausgeschlossen werden. Dafür müssen an der Anlage entsprechende Vorkehrungen getroffen werden. Neben der Prozessierung in Vakuum ist eine teilweise oder komplette Inertisierung der Anlage eine weitere Möglichkeit. Bei einer Inertisierung wird durch Zugabe von inerten Gasen, meist Stickstoff oder Argon, die Luft, und somit der Sauerstoff und die Feuchtigkeit, verdrängt. Somit beeinflusst die Stabilität der Funktionsfluide gegenüber Luft die Auslegung einer solchen Produktionsanlage. Die in den Raum dringenden Inertgase müssen ab einer gefährlichen Menge abgesaugt werden.

Eine Inertisierung einer Produktionsanlage beeinflusst die **Wirtschaftlichkeit** bezüglich der Investitionskosten negativ, da die Kosten dieser Anlage deutlich steigen werden, und der Ertrag keine Veränderung erfährt. Die Kosten steigen, da entweder ein Bereich oder die komplette Anlage eingehaust⁴⁰⁷ werden muss, damit dieses definierte Volumen mit einem inerten Gas gespült werden kann.

⁴⁰⁵ vgl. Moro/Visser (2009).

⁴⁰⁶ vgl. Becker (2006).

⁴⁰⁷ Der Begriff Einhausen beschreibt in diesem Zusammenhang, dass ein Bauteil mit einem Gehäuse versehen wird, welches nur mit kleinsten Öffnungen versehen sein sollte, mit Inertgas mit Überdruck geflutet wird, so dass keine Luft in das Gehäuse eindringen kann.

Daher fallen Investitionskosten für die Einhausung, Betriebskosten für das Inertgas sowie erhöhte Kosten für die Wartung an. Ferner lassen sich keine Preisunterschiede des Produkts begründen, da das Device für potentielle Käufer keinen Mehrwert bietet, egal ob die Funktionsfluide bei der Produktion stabil oder empfindlich gegenüber Luft sind.

Als **Hypothese** hinsichtlich der Empfindlichkeit der Funktionsfluide gegenüber Luft lässt sich festhalten, dass der Aufwand der Schutzmaßnahmen in der Produktionsanlage für empfindliche Funktionsfluide gering gehalten werden sollte. Gibt es zu einem solchen Material keine Alternative, sollte darauf geachtet werden, dass möglichst kleine Volumen inertisiert werden, damit die notwendigen Investitionen niedrig bleiben. Der Verbrauch von Inertgas lässt sich begrenzen, in dem die notwendigen Öffnungen in der Einhausung beispielsweise für den Substrattransport möglichst klein gehalten werden.

Der **Preis der Funktionsfluide** hat, anders als der Preis des leeren Substrats, einen bedeutenden Einfluss auf die Auslegung einer Produktion von druckbarer Elektronik. Aktuell sind die Materialien die größten Einzelkosten eines Devices der druckbaren Elektronik. Krebs (2010) berechnete für einen in großer Auflage gedruckten Demonstrator für die OE-A-Broschüre 2011⁴⁰⁸ die Kosten für das Device. Bei einer Fläche von 360 cm² betrugen die Gesamtkosten 5,35 €, wovon 82% (4,40 €) Materialkosten waren. Von den Materialkosten entfallen 60% (2,60 €) auf das ITO-beschichtete PET-Substrat. Nur 18% der Kosten waren dem Prozess zuzuordnen.⁴⁰⁹ Adam (2010) geht bei einem Einsatz von ITO in sehr großen Mengen wie bei der Displayproduktion von einem Preis von 1,5 €/m² aus.⁴¹⁰ Eine Reduzierung der eingesetzten Menge von Funktionsfluiden hat folglich einen großen Einfluss auf die Kosten des Devices, ohne dass die Leistung des Devices beeinträchtigt wird. Somit kann es sich von Fall zu Fall durchaus lohnen, die Anlage auf einen minimalen Fluidverbrauch hin zu optimieren. Bei additiven Verfahren wird beispielsweise deutlich weniger Funktionsfluid verbraucht, als bei subtraktiven Verfahren, da dort bereits aufgebracht-

⁴⁰⁸ OE-A, Organic Electronics Association, ist der Branchenverband für die druckbare Elektronik. Die OE-A veröffentlicht regelmäßig Informationsbroschüren. Mit der Broschüre aus dem Jahr 2011 wurde eine Taschenlampe mit gedruckten Solarzellen mitverteilt.

⁴⁰⁹ vgl. Krebs (2010).; Krebs u. a. (2011).

⁴¹⁰ vgl. Adam (2010).

tes Funktionsfluid wieder entfernt wird. So zeigt Adam (2010), dass abhängig von dem Flächenabtrag die Kosten für eine vollflächige Sputter-Beschichtung kombiniert mit der Laserstrukturierung um bis das Zehnfache teurer ist, als eine direkt mit dem Inkjet-Verfahren strukturiert aufgetragene ITO-Schicht.⁴¹¹ Allerdings sind die gesputterten Schichten derzeit noch deutlich leistungsfähiger als die gedruckten ITO-Schichten.⁴¹² Werden nach einem Rüstvorgang andere Funktionsfluide eingesetzt, müssen die Reste aus Druckwerken entfernt werden. Befinden sich noch große Mengen an Funktionsfluid im Druckwerk, können diese auf Grund der Verschmutzung nicht erneut verwendet werden. Werden beispielsweise Kurzfarbwerke⁴¹³ und kleine Fluidwannen verwendet, geht damit bei einem Rüstvorgang oder einem Auftragswechsel möglichst wenig von dem Funktionsfluid verloren. Außerdem ist auch eine Anpassung des Device-Layouts denkbar, indem die Schichtdicken minimiert werden, um weniger Material zu verbrauchen. In Zukunft sind allerdings durchaus deutlich niedrigere Preise für die Funktionsmaterialien denkbar, da diese dann in großchemischen Anlagen deutlich günstiger hergestellt werden können. Heute werden relativ kleine Mengen in Chemielaboren hergestellt. Diese Prozesse sind extrem aufwendig und nicht auf eine günstige Fertigung hin optimiert. Mit dem Bau spezialisierter Fertigungsanlagen sind deutliche Skalierungseffekte zu erwarten.⁴¹⁴ Darüber hinaus ist auch zu erwarten, dass in einem wachsenden Segment neue Anbieter auf den Markt drängen und so durch Konkurrenz die Preise erneut sinken können.

Die **Hypothese** bezüglich der Materialpreise lautet, dass bei den aktuell sehr hohen Preisen eine Reduktion der eingesetzten Materialien sinnvoll ist. Dies kann zum einen durch geringere Schichtdicken und somit einer Veränderung des Device-Layouts erreicht werden. Zum anderen kann die Produktionsanlage auf eine minimale Verschwendung optimiert werden. Neben der Frage des Preises stellt sich aus wirtschaftlicher Sicht auch die Frage der Verfügbarkeit und der Versorgungssicherheit. Aus diesem Grund sollten immer mehrere Anbieter für die eingesetzten Funktionsfluide zur Auswahl stehen.

⁴¹¹ vgl. Adam (2010).

⁴¹² vgl. Müller-Meskamp u. a. (2012).

⁴¹³ In der Druckindustrie wird von Kurzfarbwerken gesprochen, wenn das Druckfluid mit einer Rasterwalze aus dem Fluidreservoir dosiert wird. In solchen Farbwerken werden deutlich weniger Walzen eingesetzt, so dass die Speicherwirkung und das Totvolumen kleiner sind.

⁴¹⁴ vgl. Feise (2002).

Der Einfluss der **Fertigungsverfahren** auf die Auslegung einer Produktion von druckbarer Elektronik wird im Detail in untersucht. Zunächst muss bei dieser Betrachtung die Fallunterscheidung gemacht werden, ob vakuumbasierte Verfahren wie Aufdampfverfahren oder Verfahren wie Caoting- oder Druckverfahren zum Einsatz kommen. Produktionssysteme dieser beiden Verfahrensgruppen unterscheiden sich deutlich. Aufdampfverfahren benötigen ein Vakuum für den Beschichtungsvorgang. Dies setzt ein dichtes Gehäuse und Vakuumpumpen voraus. Druckverfahren können ohne Vakuum eingesetzt werden. Es gibt aber auch Roll-to-Roll-Anlagen für Aufdampfsysteme, die mehrere Quellen parallel einsetzen können, um so den notwendigen Schichtstapel für das Device in einem Transportvorgang aufbringen zu können. Der Geschwindigkeitsunterschied zu den Druckverfahren ist noch sehr groß. Auch können keine automatischen Rollenwechsler eingesetzt werden, da das Vakuum für jede Rolle erneut erzeugt werden muss. Bei den Druckverfahren gibt es kaum Auswirkungen auf das Produktionssystem. Es macht keinen Unterschied, ob beispielsweise ein Flexodruckwerk oder ein Tiefdruckwerk zum Einsatz kommt. Eine Ausnahme bilden hier die strukturierenden bzw. subtraktiven Fertigungsverfahren⁴¹⁵, da diese zwei Bearbeitungsstationen benötigen. Der Unterschied liegt also darin, dass für diese Verfahren mehr Platz und ein zusätzlicher Takt im Produktionssystem vorgesehen werden muss.

Für die **Wirtschaftlichkeit** bedeutet der Einsatz von vakuumbasierten Systemen zum einen deutlich höhere Investitionskosten und höhere Betriebskosten. Außerdem ist die Produktivität von Aufdampfanlagen auf Grund des geringen Durchsatzes wesentlich geringer. Allerdings steht dem auf der Ertragsseite meist ein höherwertiges Device und somit auch meist ein höherer zu erwartender Erlös entgegen. Die Qualität der Devices ist besser, weil sie zum einen im Vakuum prozessiert wurden und somit die Grenzschichten weniger kontaminiert sind. Zum zweiten ist die Morphologie der Schichten im Aufdampfverfahren meist deutlich homogener herzustellen und die Schichtdicken lassen sich wesentlich exakter einstellen. Bei großen Flächen und großen Mengen kommen die vakuumbasierten Systeme allerdings an ihre Grenzen. Daher lässt sich aus heutiger Sicht nur sagen, dass die Kosten dem Erlös gegenüber gestellt werden müssen, und somit eine Entscheidung nur am konkreten Fall getroffen werden kann.

⁴¹⁵ vgl Kapitel. 2.2.1

3.3.3. Untersuchung der Einflussfaktoren des Substrats

Die **mechanischen Eigenschaften** des Substrats beeinflussen zum einen das Fertigungsverfahren und zum anderen die Transportmethode. Die Bruchfestigkeit schränkt beispielsweise die Auswahl der Fertigungsverfahren ein, da speziell bei kontaktbehafteten Auftragsverfahren die Bedingung für einen mechanisch einwandfreien Substrattransport sowie Faktoren wie etwa der Anpressdruck zwischen Druckform und Substrat zu prüfen sind. Darüber hinaus muss bei Glas noch genauer gearbeitet werden, da beispielsweise bei einer Schiefstellung eines Tiefdruckzylinders das Glas brechen würde, während ein Foliensubstrat diese Schiefstellung ausgleichen könnte. Mechanische Eigenschaften wie Biegesteifigkeit, Dehnung und Reißfestigkeit bestimmen vor allem die Auswahl der Transportmethode. Können biegeeweiche Substrate wie Papier und Folie noch zu einer Rolle aufgewickelt werden, müssen biegesteife Materialien wie Glas- oder Metallsubstrate als Bogen gestapelt werden. Beim Transport von Glassubstraten muss außerdem darauf geachtet werden, dass auf Grund der Sprödigkeit am Substrat nichts absplittert. Die Dehnung des Substrats beeinflusst auch die Regelung des Substrattransports in Rollenmaschinen, da diese die maximale Zugkraft des Einzugswerks begrenzt.

Die mechanischen Eigenschaften des Substrats beeinflussen die **Wirtschaftlichkeit** nur indirekt, indem sie die Auswahl des Fertigungsverfahrens und des Transportverfahrens mitbestimmen. Diese Parameter werden in Kapitel 4 im Detail untersucht. Generell gilt, dass Substrate in gängigen Materialien, Dicken und Größen deutlich günstiger zu erwerben sind, als Sonderanfertigungen aus speziellen Materialien und in Sonderformaten. Außerdem bieten übliche Substrate den Vorteil, dass meist mehrere Lieferanten zur Auswahl stehen. Dies wirkt sich zum einen positiv auf den Preis aus und zum zweiten kann die Ausfallwahrscheinlichkeit reduziert werden.

Als **Hypothese** lässt sich sagen, dass, so lange das Device dies zulässt, Substrate gewählt werden sollten, die einen möglichst einfachen Substrattransport ermöglichen und bereits in gängigen Materialien, Dicken und Größen zur Verfügung stehen.

Die **Temperaturbeständigkeit** des Substrats beeinflusst den Einsatz von Nachbehandlungsverfahren, wie das Trocknen, Sintern oder Annealing. Aber auch der Einsatz von Laserstrukturierungsmethoden, deren Energie auf Grund der Absorption in Wärme umgewandelt wird, kann durch die Temperaturbestän-

digkeit des Substrats eingeschränkt werden. Glas- und Metall-Substrate sind hier deutlich im Vorteil, da beispielsweise PET-Folien meist für Temperaturen bis 150 °C ausgelegt sind. Aktuelle Entwicklungen bei den Substraten sind hitzestabilisierte Folien, die Temperaturen über 180 °C ausgesetzt werden können.⁴¹⁶ Viele Materialien der druckbaren Elektronik benötigen sehr lange Trocknungszeiten, die unter Laborbedingungen keine Probleme bereiten. Vor allem aber auch bei Annealing-Prozessen sind hohe Temperaturen von Vorteil. Reyes-Reyes (2005) erhitzen eine Halbleiterschicht aus P3HT:PCBM, die auf einem Foliensubstrat aufgebracht wurde, drei Minuten lang auf 155 °C. Dabei konnte die Temperatur nicht höher gewählt werden, da diese bereits nahe an der Schmelztemperatur der Folie liegt.⁴¹⁷ Auf Glassubstraten wurde dieses Material bis kurz unter dessen Schmelztemperatur von 285 °C erhitzt, was sich positiv auf die Leistungsfähigkeit auswirkte. In einer Fließfertigung beeinflussen diese Trocknungszeiten die Strecke der Trocknung erheblich, da die maximale Trocknungstemperatur durch die Temperaturbeständigkeit von Substrat und Material beschränkt ist. Aus Produktsicht sind noch weitere Eigenschaften wie beispielsweise Transparenz, UV-Beständigkeit und optische Eigenschaften zum Lichtmanagement von Bedeutung.

Aus **wirtschaftlicher Sicht** bedeutet eine eingeschränkte Temperaturbeständigkeit zum einen höhere Kosten und zum anderen weniger Erträge. Höhere Investitionskosten kommen vor allem durch die benötigten längeren Trocknungsstrecken zustande, da sich bei niedrigeren Temperaturen die Bearbeitungszeit verlängert. Die Betriebskosten werden dadurch wenig beeinflusst, da die einzusetzende Energie zum Trocknen ähnlich ist.⁴¹⁸ Durch den Einsatz eines längeren Trockners wird der Durchsatz der Produktionsanlage nicht verändert, solange die Geschwindigkeit nicht verringert wird. Die Durchlaufzeit wird steigen, so dass die Flexibilität der Produktion geringfügig verringert wird. Die Temperaturbeständigkeit der Substrate kann auch die Leistungsfähigkeit eines Devices beeinflussen, wenn zum Beispiel die optimalen Temperaturen des Annealing-Prozess über der maximalen Temperatur des Substrats liegt. Somit sind geringere Preise am Markt zu erzielen.

⁴¹⁶ vgl. MacDonald (2009).

⁴¹⁷ vgl. Reyes-Reyes u. a. (2005).; Reyes-Reyes/Kim/Carroll (2005).

⁴¹⁸ Vgl. Kröll/Kast (1989).

Als **Hypothese** lässt sich sagen, dass die Trocknungsstrecke möglichst kurz gehalten werden sollte. Hierfür ist es hilfreich Substrate einzusetzen, die für hohe Temperaturen ausgelegt sind. Für empfindliche Substrate müssen auf Grund der geringeren Temperaturen längere Trocknungszeiten und somit längere Trocknungsstrecken in Kauf genommen werden.

Der Einfluss des **Substrathandlings** auf die Auslegung einer Produktion von druckbarer Elektronik wird in Kapitel 4.4.4 im Detail untersucht. Außerhalb der Produktionsanlage werden nicht mehr einzelne Bogensubstrate oder Rollensubstratsegmente transportiert, sondern Stapel mit Bogensubstraten oder ganze Substratrollen. Daraus resultieren andere Herausforderungen, als beim möglichst exakten Fördern des Substrats innerhalb der Produktionsanlage. So wiegen solche Stapel mit Substraten oder Substratrollen bis zu mehreren Tonnen. Beim Substrathandling außerhalb der Produktionsanlage müssen Fragen beantwortet werden, wie: Können bereits bedruckte Substrate gestapelt werden? Wie können bereits bedruckte und gestapelte Substrate wieder getrennt werden? Wie häufig kann ein bedrucktes Substrat auf- und wieder abgerollt werden?

Der Einfluss der **Substrattransportmethode** auf die Auslegung einer Produktion von druckbarer Elektronik wird in Kapitel 4.3 im Detail untersucht. Der Einsatz unterschiedlicher Transportmethoden hat erheblichen Einfluss auf die Auslegung des Produktionssystems. So ist es offensichtlich, dass der Transport eines Foliensubstrats auf einer Rolle andere technischen Lösungen erfordert, als der Transport von Papierbogen oder der Transport von Glassubstraten. In Kapitel 4.3 werden zunächst alle in Frage kommenden Transportmethoden beschrieben und charakterisiert. Mögliche Verfahren sind Roll-to-Roll, Sheet-to-Sheet, Shuttle-Transport oder hybride Verfahren wie Roll-to-Sheet. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Rollentransport eine hohe Produktivität ermöglicht, der Bogentransport eine höhere Genauigkeit hat und der Shuttle-Transport sehr flexibel in der Substratauswahl ist. Mit den hybriden Verfahren lassen sich die Eigenschaften der Transportmethoden an die verschiedenen Bereiche des Produktionssystems anpassen. Um die richtige Transportmethode auswählen zu können, müssen mehrere Kriterien wie Flexibilität, Produktivität, Qualität, Zuverlässigkeit und Betrieb einer Produktionsanlage berücksichtigt werden.

Die Festlegung auf eine Transportmethode hat große Auswirkungen auf das Produktionssystem, da diese nicht mehr änderbar ist. Im Gegensatz dazu ist es deutlich einfacher ein bereits ausgewähltes Fertigungsverfahren gegen ein neues Verfahren auszutauschen. Dies ist mit überschaubarem technischem und wirtschaftlichem Aufwand umsetzbar. Das ganze Produktionssystem ist auf diese Methode hin ausgerichtet und optimiert. Ein Austausch würde den Bau eines neuen Produktionssystems bedeuten. Diese komplexe Beurteilung ist für eine fundierte Entscheidungsfindung notwendig und wird in 4.3.3 im Detail erläutert.

Als **Hypothese** lässt sich sagen, dass die Auswahl der Transportmethode sehr früh im Entwicklungsprozess festgelegt werden sollte, da diese das Layout einer Produktionsanlage maßgeblich bestimmt. Bei der Auswahl müssen Kriterien wie Flexibilität, Produktivität, Qualität, Zuverlässigkeit und Betrieb berücksichtigt werden. Darüber hinaus lässt die Transportmethode nur noch mit großem Aufwand verändern, was einer Neuentwicklung der Produktionsanlage gleich kommt.

3.3.4. Untersuchung der sonstigen Einflussfaktoren

Qualität ist ein sehr breiter Begriff, der allgemein alle Merkmale beschreibt, die ein Kunde von einem Erzeugnis erwartet.⁴¹⁹ Eine **Qualitätssicherung** in der Produktion von druckbarer Elektronik ist unerlässlich. Zum einen muss die Funktion der produzierten Devices überprüft werden, damit nur funktionierende Produkte zum Kunden ausgeliefert werden. Zum anderen sind die Funktionsmaterialien aktuell noch sehr teuer, so dass ein hoher Ausschuss einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat. Somit ist die fertigungsbegleitende und massenfertigungstaugliche Qualitätssicherung ein wichtiger Bestandteil einer wirtschaftlichen Serienfertigung der druckbaren Elektronik. Zu prüfen sind zum einen die Funktion, und zum anderen auch die Lebensdauer der produzierten Devices. Dies erfordert Verständnis für die Wirkzusammenhänge und die Schadensmechanismen der Devices. Da bis heute noch keine Qualitätssicherung für die Produktion druckbarer Elektronik existiert, fehlt das Grundlagenverständnis zur Qualitätssicherung in der druckbaren Elektronik. Daher gilt es, die Erfahrungen und Methoden aus der Qualitätssicherung der Produktion an-

⁴¹⁹ vgl. Westkämper/Warnecke (2010).

derer Erzeugnisse auf die druckbare Elektronik zu übertragen.⁴²⁰ In der Produktion von siliziumbasierten Elektronikbauteilen werden über einhundert Prozesse durchlaufen. Die bei der Kontrolle der Prozessparameter anfallenden großen Datenmengen werden durch Yield-Modeling in wenige Kennzahlen zusammengefasst.⁴²¹ Auf Grund der Komplexität ist das Yield-Management in der Halbleiterindustrie unverzichtbar. Die Gutmenge für Silizium-Bauteile wird in drei Komponenten bestimmt: Herstellungs-Yield, Test-Yield und Montage-Yield.⁴²² Der Herstellungs-Yield beschreibt den Anteil an funktionsfähigen Bauteilen, die alle Fertigungsschritte ohne Beschädigungen durchlaufen haben. Der Test-Yield gibt den Anteil an Bauteilen an, deren Eigenschaften den Anforderungen entsprechen. Der Montage-Yield ist der Anteil an Bauteilen, der verkauft werden kann.⁴²³ „Diese Aufstellung lässt sich unmittelbar für das funktionale Drucken übernehmen: der Herstellungs-Yield entspricht dem Anteil erfolgreich bedruckter Substratfläche. Der Test-Yield ist der Prozentsatz funktionsfähiger Bauteile vor der Vereinzelung und der Montage-Yield die Quote verkaufsbereiter Elemente.“⁴²⁴ Der Gesamt-Yield ist schließlich das Produkt seiner Einzelkomponenten. Bei der Betrachtung der Gutmenge in der Silizium-Industrie wird dabei zwischen der Leistungsfähigkeit einzelner Elemente unterschieden wird, damit der maximale Verkaufspreis jedes Produkt ermittelt werden kann. Durch geringere Mängel von Produkten können diese womöglich in anderen Anwendungsbereichen eingesetzt werden und werden nicht als Ausschuss betrachtet.⁴²⁵ Dies scheint allerdings für die anvisierte hohe Produktionsmenge schwer auf die druckbare Elektronik übertragbar.

In der Silizium-Industrie wird das „Yield Learning“ eingesetzt, um Verbesserungen im Produktionsprozess systematisch zu erarbeiten. So geben beispielsweise El-Kareh, Ghatalia und Satya für den Yield einer Pilotfertigung 20–30% an. Bis zur Serienfertigung steigt dieser Wert auf ca. 50% und im weiteren Verlauf auf etwa 80%.⁴²⁶ Bezüglich des „Yield Learnings“ können folgende Unterschiede zwischen einer bereits laufenden und einer sich im Aufbau befindenden Fertigungslinie ausgemacht werden:

⁴²⁰ vgl. Schnell (2011).

⁴²¹ vgl. Kumar u. a. (2006).

⁴²² vgl. Cunningham/Spanos/Voros (1995); El-Kareh/Ghatalia/Satya (1995).

⁴²³ vgl. El-Kareh/Ghatalia/Satya (1995).

⁴²⁴ Stocker (2012).

⁴²⁵ vgl. Han/Dong/Shao (2011).

⁴²⁶ vgl. El-Kareh/Ghatalia/Satya (1995).

In einer etablierten Produktion bestimmen zufällige Fehler die Höhe des Yields, während in einer neu installierten Linie systematische Fehler vorliegen. Durch die noch nicht optimierte Qualitätskontrolle und fehlender etablierter Prognosemodelle, werden in solchen Fällen systematische Fehler womöglich nicht sofort erkannt.⁴²⁷ Diese Beobachtung lässt sich auf die druckbare Elektronik übertragen. „Die momentan vorherrschende Laborproduktion in kleinen Stückzahlen lässt keinen langfristigen Gleichgewichtszustand in der Druckmaschine zu, bei dem die Prozessparameter kontinuierlich optimiert werden können.“⁴²⁸

Darüber hinaus kann aus der Produktion der siliziumbasierten Elektronik gefolgert werden, dass bereits auf der Entwurfsseite Anpassung am Design notwendig sind, um Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit überprüfen zu können. Dies kann beispielsweise geschehen durch die angepasste Festlegung von Entwurfs-Margen oder Teststrukturen sowie durch „die Nutzung von Redundanz und Fehler korrigierenden Architekturen“.⁴²⁹ Hierfür ist es notwendig, die zu erwartenden Fehlerhaftigkeiten der Devices zu kennen. Für den Aufbau einer Produktion bedeutet das, dass Verfahren zur Qualitätssicherung in den Prozess integriert werden müssen. Da diese Verfahren noch nicht existieren, gilt es die bekannten Qualitätssicherungsmaßnahmen aus dem Laborbetrieb, wie beispielsweise die Schichtdickenmessung, weiterzuentwickeln. Aus Produktionssicht muss überprüft werden, ob die Funktion der Devices direkt überprüft werden kann, oder ob indirekt Verfahren wie das Messen der Schichtdicke oder der Schichthomogenität notwendig sind. Aus Produktionssicht ist vor allem die Dauer einer Messung ein wichtiges Kriterium, da diese die Produktionsgeschwindigkeit mitbestimmt. Gegenüber den Produktionsprozessen in der Siliziumindustrie sind die möglichen Messzeiten in der druckbaren Industrie deutlich kürzer. Darüber hinaus gilt es zu klären, ob eine indirekte Prozesskontrolle möglich ist, wie es beispielsweise in der grafischen Industrie angewendet wird.

Aus **wirtschaftlicher Sicht** lassen sich diese Maßnahmen schwer analysieren. Jedes nicht verkaufbare Produkt verursacht Kosten, dem kein Ertrag gegenübersteht. Die Funktionsmaterialien sind aktuell noch sehr teuer, so dass ein hoher Ausschuss einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat. Die Herstellungskosten für ein defektes Device sind identisch zu denen eines funktions-

⁴²⁷ vgl. Ouyang u. a. (2007); vgl. Li u. a. (o. J.).

⁴²⁸ Stocker (2012).

⁴²⁹ Schnell (2011).

tüchtigen Devices. Die Stückkosten verhalten sich umgekehrt proportional zum erreichten Yield.⁴³⁰ Niedrige Stückkosten, die für den Markterfolg als notwendig erachtet werden, sind nur bei höchster Prozesseffizienz erreichbar.⁴³¹ Auf der anderen Seite verursachen Messeinrichtungen, die den Ausschuss detektieren, und Maßnahmen, die den Ausschuss minimieren, Kosten. Diese Größen gilt es in dem konkreten Fall genauer zu analysieren. Neben dem entgangenen Erlös durch Makulatur⁴³² muss vor allem auch der Imageschaden beim Kunden betrachtet werden, der durch defekte Produkte verursacht werden kann. Der Schaden kann nur schwer in konkreten Geldbeträgen ausgedrückt werden.

Eine detaillierte **Hypothese** für die Qualitätssicherung in der Produktion von druckbarer Elektronik kann zurzeit nicht abgeleitet werden, weil noch kein Konzept existiert und zu viele Fragen offen sind. Da die Qualitätssicherung allerdings großen Einfluss auf den Produktionsprozess und auf die Produktionsanlagen der druckbaren Elektronik haben wird, sollte diese bereits sehr früh in dem F&E-Prozess berücksichtigt werden.

Aus wirtschaftlicher Sicht sollte Ausschuss unbedingt vermieden werden. Zum einen können damit Kosten für nicht verkaufbare Produkte reduziert werden, und zum anderen kann ein Imageschaden vermieden werden, wenn defekte Produkte an Kunden geliefert werden. Die notwendigen Investitionskosten für eine Erhöhung der Gutmenge müssen den entgangenen Erträgen entgegengestellt werden.

Für die Auslegung einer Produktionsanlage für die druckbare Elektronik sind vor allem die zwei **Leistungskennzahlen** Fertigungsmenge und Gutmenge (Yield) relevant. Die Gutmenge wurde bereits in dem vorherigen Abschnitt beschrieben.

Die **Fertigungsmenge** ist die Menge an Devices, die in einer bestimmten Zeit durch die Produktionsanlage hergestellt werden; unabhängig von deren Funktionsfähigkeit. Die Fertigungsmenge M_F bestimmt zusammen mit der technisch realisierbaren Gutmenge Y den notwendigen Durchsatz D_{\max} einer Fertigungsanlage. Liegt beispielsweise die Gutmenge nur bei 50%, muss die doppelte Fertigungsmenge produziert werden. Der maximale Durchsatz einer Produktions-

⁴³⁰ vgl. Hatch/Mowery (1998).

⁴³¹ vgl. Kalowekamo/Baker (2009).

⁴³² Makulatur bezeichnet in der Druckindustrie beschädigte oder fehlerhafte Drucke. Vgl. Teschner (2002).

anlage wird aus technischer Sicht durch die Breite des Substrats, sowie durch die Produktionsgeschwindigkeit bestimmt.

$$D_{max} = \frac{M_F}{Y} \quad \text{Formel 3.3}$$

Konkret beeinflussen diese Leistungskennzahlen daher zum einen die Breite des Substrats und die Produktionsgeschwindigkeit. Können weder die Substratbreite noch die Produktionsgeschwindigkeit gesteigert werden, besteht die Möglichkeit mehrere Produktionsanlagen parallel in Betrieb zu nehmen. Aus heutiger Sicht sind die Produktionsgeschwindigkeiten vor allem durch die Verarbeitbarkeit der Funktionsmaterialien limitiert. Im Gegensatz dazu kann die Breite einer Anlage einfach variiert werden. In heutigen Druckmaschinen der graphischen Industrie sind Substratbreiten von wenigen Zentimetern bis weit über vier Metern⁴³³ realisierbar. Der technisch notwendige Aufwand variiert dabei erheblich. Auch die Geschwindigkeiten dieser Maschinen variieren von maximal 5,5 m/s für Bogendruckmaschinen⁴³⁴ bis zu maximal 17 m/s für Rollendruckmaschinen.⁴³⁵ Solche Geschwindigkeiten sind mit den aktuellen Funktionsmaterialien und den eingesetzten Prozessen noch nicht realisiert worden. Somit ist es aus heutiger Sicht bezüglich der Geschwindigkeit nicht relevant, ob das Substrat als Bogen oder als Rolle vorliegt.

Aus **wirtschaftlicher Sicht** wird die zu fertigende Menge von der absetzbaren Menge bestimmt. Ziel aus wirtschaftlicher Sicht ist also die gewinnmaximierende Produktionsmenge zu bestimmen. Übersteigt die absetzbare Menge die Fertigungsmenge einer Produktionsanlage, kann über die Investition einer weiteren Anlage nachgedacht werden. Als Instrument steht der Betriebswirtschaftslehre die Investitionsrechnung zur Verfügung, um die Wirtschaftlichkeit einer Investition zu bestimmen.⁴³⁶ Generell gilt, dass die Kosten für eine produktive Maschine geringer ausfallen, als für zwei Maschinen, die zusammen den gleichen Output bringen. Bei der Frage, ob eine oder zwei Maschinen sinnvoll sind, muss das Risiko der Investition gegen die Flexibilität abgewogen werden. Übersteigt die absetzbare Menge die Kapazität der ersten Maschine, muss eine Er-

⁴³³ Diese Angaben gelten für die Rollentiefdruckmaschine TR 12B/432 des Herstellers KBA AG.

⁴³⁴ Diese Angaben gelten für die Bogenoffsetdruckmaschine Speedmaster XL 162 des Herstellers Heidelberger Druckmaschinen AG.

⁴³⁵ Diese Angaben gelten für die Rollenflexodruckmaschine Vistaflex C des Herstellers Windmöller und Hölscher.

⁴³⁶ vgl. Götze (2008).

weiterungsinvestition näher betrachtet werden, auch wenn diese Maschine anfangs nicht ausgelastet wird. Eine wichtige Information für diese Entscheidung ist die Einschätzung über die zukünftige absetzbare Menge und die zukünftige Entwicklungen in der Maschinentechnik.

Die **Empfindlichkeit** des Prozesses oder des Bauteils **gegenüber Verschmutzung** kann zu Bauteilversagen und somit zu einer geringeren Gutmenge führen.⁴³⁷ Um die Gutmenge zu erhöhen kann die Staubbelastung reduziert werden.⁴³⁸ Bei gegebenem Device-Layout bleibt nur die Möglichkeit, die komplette Produktionsanlage in einen Reinraum zu bauen. Dies führt zu Einschränkung in der Konstruktion der Produktionsanlage, da die Kontamination mit Staub durch die Anlage selbst auch berücksichtigt werden muss. Da sich die Standfläche durch einen Reinraum deutlich verteuert, steigt auch der Druck, die Produktionsanlage möglichst kompakt zu bauen. Die Erfahrung zeigt, dass fast alle Labore, die aktuell an solchen Prozessen forschen, ihre Anlagen in Reinräumen betreiben.⁴³⁹ Aus heutiger Sicht scheint eine Reduzierung der Staubbelastung durch Reinräume der einzige Weg zu sein, die Gutmenge entsprechend hoch zu halten, wenn ohne Vakuum gearbeitet werden soll. Die Schichtdicken, die notwendig wären, damit die Bauteile unempfindlich gegenüber Staub würden, scheinen aus heutiger Sicht technisch nicht sinnvoll. Für Aufdampfprozesse gilt diese Notwendigkeit nicht, da diese im Vakuum stattfinden. Findet bei diesen Anlagen auch der Transport der Substrate mit den empfindlichen Schichten im Vakuum statt, kann in diesem Falle auf einen Reinraum verzichtet werden.

Für die **Wirtschaftlichkeit** bedeutet ein Reinraum in erster Linie deutlich höhere Investitionskosten. Dazu kommen die hohen Betriebskosten durch Reinigung und Konditionierung der Luft, sowie Wartung und Reinigung des Reinraums. Der Betrieb eines Reinraums hat auch Einfluss auf die Arbeitszeiten, da mit der notwendigen Schutzkleidung nur eine eingeschränkte Zeit ohne Pause gearbeitet werden darf. Zusätzlich schränkt die Schutzkleidung auch die Arbeit ein, da die Sinne wie Sehen oder Fühlen eingeschränkt sind.

⁴³⁷ Vgl. Kapitel 4.3.3.

⁴³⁸ Bei sehr großen Schichtdicken im Vergleich zu der Größe von Staubpartikel, stellt sich die Frage nach Defekten durch Staub weniger. Allerdings liegen die notwendigen Schichtdicken üblicherweise bei nur wenigen 10 Nanometern, so dass hier bereits kleinste Staubpartikel großen Einfluss haben.

⁴³⁹ Beispiele hierfür sind die InnovationLab GmbH, Heidelberg; Holst Center, Eindhoven; VTT Technical Research Center of Finland

Eine konkrete **Hypothese** kann in diesem Fall nicht abgeleitet werden. Da mit einem Reinraum hohe Investitions- und Betriebskosten anfallen, sollte dieser aus Kostensicht unbedingt vermieden werden. Allerdings machen bestimmte Devices mit sehr dünnen Schichten einen Reinraum dringend notwendig, so dass sich dadurch die Gutmenge deutlich erhöhen lässt. In diesem Falle gilt es die zu erzielenden Erträge den Kosten in einem bestimmten Zeitraum entgegen zu setzen.

3.4. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen für eine Optimierung der Produktion erarbeitet, indem die Einflussfaktoren identifiziert wurden, welche einen Einfluss auf die Produktion haben. In Kapitel 3.1 wurde zunächst der Fertigungsprozess von organischer Photovoltaik in einer allgemeinen Form dargestellt und in Einzelprozesse unterteilt. Darauf aufbauend wurde in Kapitel 3.2 der Produktionsprozess systematisch auf Einflussfaktoren analysiert, welche die Auslegung einer Produktion beeinflussen können. Diese Parameter wurden beschrieben und kategorisiert. In Kapitel 3.3 wurde eine Auswahl der Einflussparameter auf technische und wirtschaftliche Aspekte hin untersucht und Hypothesen abgeleitet. Folgende Parameter wurden im Detail untersucht:

- 1) *Das Device-Design betreffend*: Schichtaufbau, geometrische Struktur und Register sowie Empfindlichkeit ggb. Schmutz.
- 2) *Das Funktionsfluid betreffend*: Lösemittel und Explosionsschutz, Stabilität ggb. Luft und Inertisierung Preis sowie Fertigungsverfahren.
- 3) *Das Substrat betreffend*: mech. Eigenschaften, Temperaturbeständigkeit, Transport-Methode sowie Handling
- 4) *Sonstige Parameter*: Qualitätssicherung, Leistungskennzahlen wie Fertigungsmenge und Gutmenge, sowie Anordnung der Bearbeitungsstationen.

Es wurde eine grundsätzliche Klassifikation für die Einflussparameter einer Produktion druckbarer Elektronik erstellt. Diese hilft, die Diskussion um die druckbare Elektronik mit Hinblick auf die künftigen Herausforderungen wie Upscaling und Produktion zu strukturieren.

Diese Parameter wurden evaluiert, um eine Auswahl zu treffen, die in Kapitel 4 näher untersucht wird. Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die drei wichtigsten Aspekte der Produktionsplanung für die druckbare Elektronik die Auswahl der Fertigungsverfahren, die Auswahl der Substrattransportmethode sowie die Anordnung der ausgewählten Bearbeitungsstationen zu einem Produktionssystem sind.

Somit konnten technische und wirtschaftliche Entscheidungskriterien definiert werden, anhand derer eine Entscheidung zum Aufbau einer Produktion getroffen und begründet werden kann.

4. Einfluss entscheidender Parameter auf die Produktion

In Kapitel 3 wurden Parameter identifiziert, die einen Einfluss auf die Auslegung der Produktion von druckbarer Elektronik haben. Diese Parameter wurden auf deren technischen und wissenschaftlichen Einfluss untersucht und bewertet. Anschließend wurde für jedes Kriterium eine Hypothese abgeleitet. In diesem Kapitel werden die drei wichtigsten Aspekte der Produktionssystemplanung für die druckbare Elektronik analysiert und Lösungen dargestellt. Die Produktionssystemplanung lässt sich durch drei Aspekte charakterisieren, die alle anderen Parameter weitgehend festlegen: die Auswahl der Fertigungsverfahren, die Auswahl der Substrattransportmethode sowie die Anordnung der ausgewählten Bearbeitungsstationen zu einem Produktionssystem.

Das Kapitel beginnt zunächst mit der Herleitung der grundlegenden Systematik substratbasierter Produktion (Kapitel 4.1). Diese hat zum Ziel, die Besonderheiten einer auf Substraten basierten Produktion grundlegend zu beschreiben. Daraufhin folgen für die in Kapitel 3 hergeleiteten drei wichtigsten Parameter tiefgehende Untersuchungen:

In Kapitel 4.2 wird die Auswahl von Fertigungsverfahren und deren Einfluss auf die Produktion untersucht.

In Kapitel 4.3 wird der Einfluss der Substrattransportmethode auf die Produktion beschrieben. Darüber hinaus werden mehrere Substrattransportmethoden vorgestellt und Kriterien beschrieben, anhand derer die passende Methode ausgewählt werden kann.

Kapitel 4.4 beschreibt den Einfluss der Produktionsstruktur auf die Auslegung einer Anlage. Hierfür werden unterschiedliche Lösungen zur Anordnung von Bearbeitungseinheiten analysiert und optimiert.

4.1. Systematik substratbasierter Produktion

Für die Systematik substratbasierter Produktion wird zunächst der Begriff des Substrats definiert und abgegrenzt:

Substrat⁴⁴⁰ ist der Begriff für eine Unterlage für einen aufzubauenden Gegenstand. Er bezeichnet einen materiellen Träger von definierter Gestalt und Materialzusammensetzung. Dieser Träger dient nachgelagerten Fertigungsschritten als Unterlage.⁴⁴¹

Daraus ergeben sich in unterschiedlichen Zusammenhängen spezielle Bedeutungsaspekte. In dem Fall der druckbaren Elektronik sind Substrate feste und meist flache Materialien, auf denen eine oder mehrere Schichten aufgebracht werden. Dabei kann das Substrat noch weitere Funktionen über die Funktion des Trägermaterials hinaus übernehmen. Abhängig von dem Einsatzfall sind Funktionen wie elektrische Isolation, elektrische Leitfähigkeit oder Verkapselungseigenschaften denkbar.⁴⁴²

Substrate und substratspezifische Technologien kommen in vielen unterschiedlichen Industrien zum Einsatz. Weit verbreitet ist die Verwendung von Substraten in der graphischen Druckindustrie oder auch in den Druckern im Heim-Bereich, wo das Substrat auch Bedruckstoff genannt wird. Besonders hochentwickelte Substrate kommen beispielsweise in der Displayproduktion sowie in der Elektronik- und Mikrosystemfertigung⁴⁴³ zum Einsatz. In der Displayproduktion werden Glasscheiben als Substrate eingesetzt, auf die verschiedene Schichten und Funktionen aufgebracht werden.⁴⁴⁴ In der Elektronikfertigung kommen sogenannte PCBs⁴⁴⁵ zum Einsatz, auf die elektrische Verbindungen aufgedruckt und andere Bauelemente aufgebracht werden.⁴⁴⁶ Allgemein lässt sich die substratbasierte Produktion wie folgt definieren:

⁴⁴⁰ Substrat stammt von dem lateinischen Wort *substernere* ab und bedeutet „unterbreiten, unterwerfen, bedecken“ sowie von dem Wort *stratum*, welches „Schicht“ bedeutet. Je nach Situation können für das Wort Substrat auch andere Begriffe verwendet werden: Werkstück, Bedruckstoff, Flachformstoffe. Vgl. Wikipedia (2012a)..

⁴⁴¹ vgl. Wikipedia (2012a).; vgl. Wikipedia (2012b).

⁴⁴² vgl. Willmann/Stocker/Dörsam (2013).

⁴⁴³ Als Substrate kommen in der Mikrosystemfertigung unterschiedliche Materialien wie beispielsweise Silizium, Glas oder Polymere zum Einsatz. Vgl. Völklein/Zetterer (2006).

⁴⁴⁴ vgl. Chen (2011).

⁴⁴⁵ Der englische Begriff PCB - Printed Circuit Board steht für bedruckte Leiterplatten.

⁴⁴⁶ vgl. Robertson (2004).; vgl. Dessouky/Adiga/Park (1995).

Die substratbasierte Produktion ist das Herstellen von Devices durch Aufbringen und Bearbeiten von Schichten auf einem Substrat.

Da ein Substrat durch das Aufbringen der funktionalen Schichten verändert wird, stellt sich die Frage, ob es durch die Veränderungen noch als Substrat bezeichnet werden kann. Dies ist insofern von Bedeutung, da sich die Eigenschaften wie Temperaturbeständigkeit oder die mechanischen Eigenschaften während des Produktionsprozesses verändern.

Ein Substrat, wie es zu Beginn der Produktion vorliegt, wird als Substratrohling bezeichnet. Sobald alle notwendigen Schichten auf das Substrat aufgebracht wurden und es den Produktionsprozess verlässt, wird es als Device bezeichnet. Das Device ist folglich ein Bauteil, welches in diesem Zustand direkt in das Endprodukt montiert werden kann. Dafür muss es bereits vereinzelt sein. Während des Produktionsprozesses, wird der bereits bearbeitete Substratrohling, der schon mehrere Schichten trägt und im nächsten Schritt noch eine weitere aufgetragen werden, als Substrat bezeichnet.

Somit steht der Begriff Substrat für den zu beschichtenden Gegenstand, unabhängig der bereits aufgetragenen Schichten. Vor der Produktion wird es Substratrohling und nach Fertigstellung Device genannt.

Substratbasierte Produktionsprozess

In dem folgenden Abschnitt wird der substratbasierte Produktionsprozess allgemein beschrieben: Jeder substratbasierte Produktionsprozess lässt sich mit den folgenden sechs Komponenten grundlegend charakterisieren:

- 1) Fertigungstechnologien
- 2) Kontakt-Geometrie
- 3) Substrattransportmethode
- 4) Substratbewegung
- 5) Substratzuführung
- 6) Integrationsgrad

Abb. 4.1 zeigt die sechs Komponenten der Systematik substratbasierter Produktion mit ihren Ausprägungen. Diese Komponenten sind, bis auf wenige Ausnahmen, unabhängig voneinander. Mit diesen Komponenten lässt sich jede

substratbasierte Produktion grundlegend beschreiben.⁴⁴⁷ Diese Komponenten werden in dem folgenden Abschnitt beschrieben und definiert.

Fertigungs- technologien	Additiv	Drucken	Coaten	Aufdampfen	...	
	Sub- traktiv	Ablation	Ätzen	...		
	Struktu- rierend	Wetting / De-Wetting	Imprint- Technologien	Bonden	...	
Kontakt- geometrie	Flach-auf-Flach		Rund-auf-Flach	Rund-auf-Rund	Ohne-Kontakt- auf-Flach	Ohne-Kontakt- auf-Rund
Substrattransport- methode	Roll-to-Roll		Roll-to-Sheet	Sheet-to-Sheet	Sheets-on-Shuttle	
Substrat- bewegung	Diskontinuierlich		Kontinuierlich			
Substrat- zuführung	Unterbrochen		Non-Stop			
Integrations- grad	Niedrig (offline)		Mittel	Hoch (inline)		

Abb. 4.1: Sechs Komponenten der Systematik substratbasierter Produktion und ihre Ausprägungen
Quelle: In Anlehnung an Willmann/Stocker/Dörsam (2012)

Fertigungstechnologien

Wie in Kapitel 2.2.1 dargestellt, existieren eine Vielzahl von Fertigungsverfahren, die sich für das Aufbringen von funktionalen Schichten eignen. Um die Übersicht zu wahren, sind hier die Fertigungstechnologien Drucken, Coaten und Aufdampfen genannt. In Kapitel 4.2.1 wird das Vorgehen bei der Auswahl eines passenden Fertigungsverfahrens für einen Produktionsprozess beschrieben.⁴⁴⁸

Kontakt-Geometrie

Die Unterscheidung von Kontakt-Geometrien bezüglich substratbasierter Fertigung hat sich aus dem graphischen Druck entwickelt und wird dort als Druck-

⁴⁴⁷ vgl. Willmann/Stocker/Dörsam (2013).

⁴⁴⁸ Der Begriff Fertigungstechnologie ist ein Überbegriff und beschreibt eine Gruppe von Fertigungsverfahren wie das Drucken, Coaten oder Aufdampfen. Fertigungsverfahren sind beispielsweise der Tiefdruck, Schlitzgießverfahren oder Sputtern.

prinzip bezeichnet. Der Druckprozess der klassischen Druckverfahren besteht aus dem Zusammentreffen von Druckform und Druckkörper, die flächig oder zylindrisch ausgeführt sein können.⁴⁴⁹ Dadurch lassen sich die Kontakt-Geometrien *flach auf flach*, *rund auf flach* und *rund auf rund* ableiten. Folglich bezeichnet die Kontakt-Geometrie die Anordnung des Zusammentreffens von Druckform, bzw. allgemein von der Strukturierungsvorlage, und dem Substrat.

Bei der Geometrie *flach auf flach* sind die Druckform und der Druckkörper planar ausgeführt. Beim Druckvorgang werden beide aufeinander gepresst. Das einfachste Verfahren dieser Geometrie ist das Stempeln. Noch heute kommt diese Geometrie beispielsweise beim Flachbettsiebdruck zum Einsatz.

Bei der Kontakt-Geometrie *rund auf flach* ist einer der beiden Körper zylindrisch ausgeführt. Bei den sogenannten Schnellpressen wurde die Druckform flach ausgeführt und das Substrat mit dem zylindrischen Gegendruckzylinder über die Druckform gerollt. Heute wird die Geometrie noch in Probedruckmaschinen der ersten Stufe⁴⁵⁰ eingesetzt, wobei hier auch Maschinen existieren, deren Druckform zylindrisch gestaltet ist.

Die Geometrie *rund auf rund* war eine konsequente Weiterentwicklung der anderen Geometrien, bei der beide Körper zylindrisch geformt sind. Da sich die Druck- und Gegendruckzylinder nun konstant in eine Richtung drehen, sind deutlich höhere Fertigungsgeschwindigkeiten möglich.⁴⁵¹

Über die klassischen Druck- und Beschichtungsverfahren hinaus, wurden in den letzten Jahrzehnten Verfahren entwickelt, bei denen es zu keiner Berührung des Substrats kommt und somit auch keine Kraft übertragen wird. Dazu gehören beispielsweise Verfahren wie Inkjet, Aerosol, Slot-Die-Coating sowie die Aufdampfverfahren. Diese werden in der Gruppe *Ohne Kontakt* Verfahren zusammengefasst. Hierbei kann ebenfalls unterschieden werden, ob das Substrat flach aufliegt, oder über einen Zylinder bewegt wird. Somit kann zwischen den Geometrien *Ohne Kontakt auf flach* und *Ohne Kontakt auf rund* unterschieden werden. Die fünf Kontakt-Geometrien sind symbolisch in Abb. 4.2 dargestellt.

⁴⁴⁹ vgl. Willmann/Stocker/Dörsam (2013); Teschner (2002).

⁴⁵⁰ vgl. Kapitel 4.2.

⁴⁵¹ Kipphan (2001).

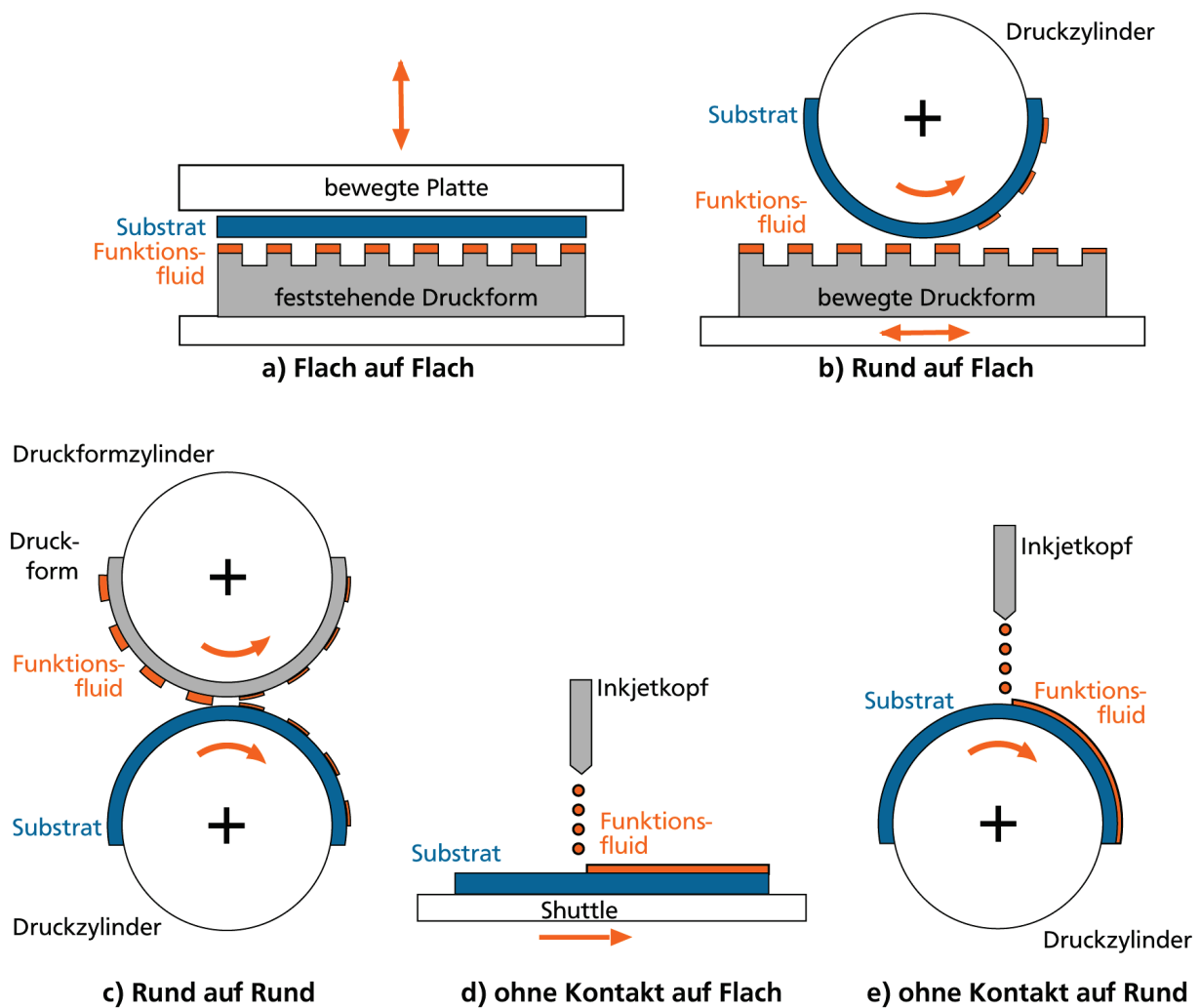


Abb. 4.2: Symbolische Darstellung der fünf Kontakt-Geometrien der substratbasierten Fertigung
 Quelle: In Anlehnung an Willmann, Stocker, Dörsam (2012) und Kipphan (2001)

Substrattransportprinzip

Die Substrattransportmethode ist die Art, wie ein Substrat in einer Fertigung transportiert wird, ohne Betrachtung der detaillierten technischen Ausführung. Für den Transport von Substraten nach der Definition in Tabelle 4.1, werden vier verschiedene Transportprinzipien unterschieden: Rollentransport (R2R – Roll-to-Roll), Bogentransport (S2S – Sheet-to-Sheet), hybride Verfahren wie Rolle-zu-Bogen-Transport (R2S – Roll-to-Sheet) sowie Transport über Substrat-träger (Sheets-on-Shuttle). Diese Verfahren, sowie deren Einfluss auf die Fertigung von druckbarer Elektronik, werden in Kapitel 4.3 beschrieben.⁴⁵²

⁴⁵² vgl. Willmann/Stocker/Dörsam (2013).

Substratbewegung

Das Substrat kann in einer Fertigungsanlage mit gleichbleibender Geschwindigkeit oder mit verändernder Geschwindigkeit gefördert werden.⁴⁵³ Konstante Bewegung liegt vor, wenn die aktuelle Geschwindigkeit des Substrats an jeder Stelle in der Produktionsanlage der Durchschnittsgeschwindigkeit entspricht.⁴⁵⁴ Bei den meisten Druckmaschinen aus der graphischen Industrie wird das Substrat mit gleichbleibender Geschwindigkeit durch die Anlage gefördert. Dies ist bis zu etwa einem Dutzend Bearbeitungsstationen möglich, insofern alle Druckwerke die gleiche optimale Druckgeschwindigkeit haben. Bei der druckbaren Elektronik kommen voraussichtlich unterschiedliche Fertigungsverfahren zum Einsatz, deren optimale Geschwindigkeiten häufig nicht identisch sind. Um diese unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu ermöglichen, können entweder mehrere Maschinen eingesetzt werden, deren Maschinengeschwindigkeiten unabhängig sind oder es werden Substratspeicher eingesetzt. Dieser Substratspeicher stellt einen Vorrat an beschichtetem Substrat für eine nachfolgende schnellere Bearbeitungsstation zur Verfügung. Die nachfolgende Bearbeitungsstation kann das beschichtete Substrat mit höherer Geschwindigkeit aus dem Speicher entnehmen und bearbeiten. Ist der Substratspeicher leer, wird das beschichtete Substrat in diesem Bereich gestoppt bis der Substratspeicher durch die langsamere Station wieder gefüllt wurde. Durch solche Substratspeicher können auch diskontinuierliche Prozesse wie beispielsweise Flachbettsiebdruck in eine Rollenmaschine integriert werden. Die Substratspeicher können sowohl für Rollensubstrate als auch für Bogensubstrate eingesetzt werden.⁴⁵⁵

Substratzuführung

Es werden zwei Ausprägungen der Substratzuführung unterschieden: Eine Produktionsanlage kann in einem kontinuierlichen oder in einem diskontinuierlichen Modus betrieben werden.

Ein diskontinuierlicher Betrieb liegt vor, wenn die Produktionsanlage bei aufgebrauchtem Substratvorrat gestoppt werden muss, um die Maschinen neu zu rüsten und den Substratvorrat wieder aufzufüllen: Bei einer Bogenmaschine

⁴⁵³ Wird die Geschwindigkeit als Vektor beschrieben, kann sich diese ändern, da sich die Richtung des Substrats in einer Maschine ändern kann. Daher wird hier der Betrag der Geschwindigkeit beschrieben.

⁴⁵⁴ Da das Substrat in einer Druckmaschine bzw. einer Produktionsanlage mehrfach umgelenkt wird, bleibt die Geschwindigkeit nur als Skalar konstant, aber nicht als Vektor.

⁴⁵⁵ vgl. Willmann/Stocker/Dörsam (2013).

wird der Bogenstapel und bei einer Rollenmaschine die Substratrolle aufgebraucht.

Ein kontinuierlicher Betrieb liegt folglich dann vor, wenn die Produktionsanlage konstant mit allen Verbrauchsmaterialien und Betriebsstoffen versorgt wird, so dass die Maschine nicht gestoppt werden muss. Um dies zu ermöglichen, benötigen diese Maschinen eine Vorrichtung, womit der Substratvorrat im laufenden Betrieb aufgefüllt werden kann. Bei Bogenmaschinen wird der Substratstapel von unten durch einen sogenannten Non-Stop-Bogenanleger aufgefüllt. Bei Rollenmaschinen wird die Papierbahn der neuen Rolle bei unveränderter Produktionsgeschwindigkeit an die Papierbahn der alten Rolle angeklebt. Dafür wird die neue Substratrolle zunächst auf Maschinengeschwindigkeit beschleunigt.⁴⁵⁶ Für Rollenmaschinen gibt es auch Rollenwechselsysteme mit stillstehenden Rollen, bei denen ein großer Substratspeicher eingesetzt wird.

Ein kontinuierlicher Betrieb von Produktionsanlagen ist deutlich effizienter, da diese mit weniger Rüstzeiten produzieren können. Dadurch erhöht sich zum einen der Durchsatz und zum anderen wird die Makulatur reduziert, da die Produktion permanent im Gleichgewicht bleibt. Somit ist ein kontinuierlicher Betrieb für die Fertigung großer Mengen des gleichen Produkts vorteilhaft.

Integrationsgrad

Der Integrationsgrad beschreibt, wie stark die einzelnen Bearbeitungsstationen in einer Produktionsanlage integriert werden. Für dieses Maß existieren zwei Extreme: Zum einen die Bearbeitung der jeweiligen Prozessschritte in einzelnen Maschinen. Dabei handelt es sich um einen sehr niedrigen Integrationsgrad. Dies wird häufig auch als offline oder diskret bezeichnet. Bei einem sehr hohen Integrationsgrad werden alle Bearbeitungsschritte in eine Produktionsanlage integriert. Dies wird häufig als inline oder integriert bezeichnet. Diese beiden beschriebenen Varianten sind in Abb. 4.3 dargestellt.

⁴⁵⁶ vgl. Kipphan (2001).

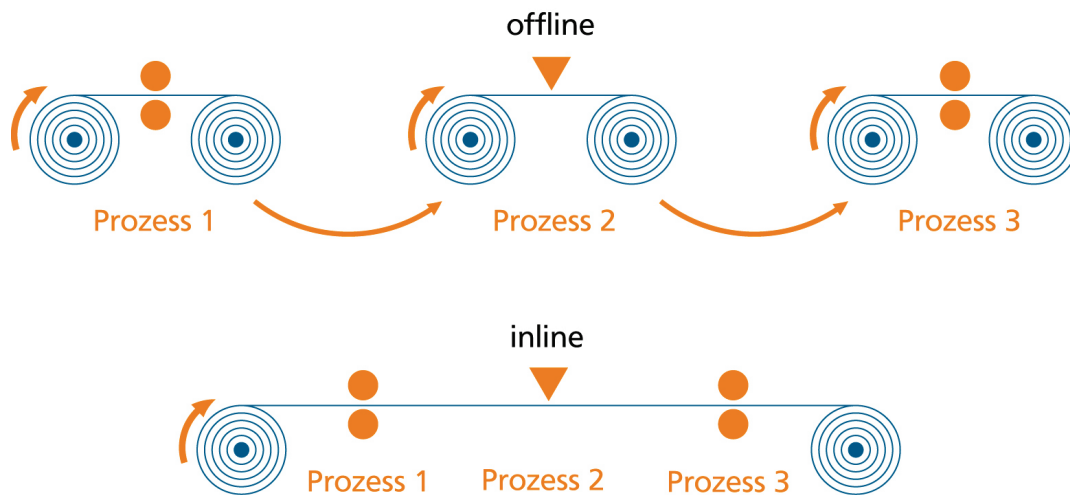


Abb. 4.3: Die zwei extremen Ausprägungen des Integrationsgrades einer Produktion: offline und inline.

Die Darstellung der Systematik substratbasierter Produktion in Abb. 4.1 ist nach dem Prinzip eines morphologischen Kastens aufgebaut.⁴⁵⁷ Diese Abbildung zeigt den Lösungsraum für die Gestaltung substratbasierter Produktionsanlagen. Die erste Komponente, die Fertigungstechnologien, hängen sowohl von dem geplanten Produktionsprozess ab, wie auch von den Material- und Design-Parametern.⁴⁵⁸ Die weiteren fünf Parameter sind von dem Material unabhängig und bestimmen die Gestaltung der Produktion.

Dadurch ist das Gesamtbild der substratbasierten Produktion in voneinander unabhängige Entscheidungsbereiche gegliedert. Für die einzelnen Entscheidungsbereiche werden getrennt Lösungen zusammengetragen, so dass neue Gesamtlösungen als Kombination der Einzellösungen gebildet werden können. In der in Abb. 4.4 dargestellten Matrix sind mehrere Dutzend Lösungswege denkbar, die einem möglichen Produktionssystem für die druckbare Elektronik entsprechen. Die Matrix in Abb. 4.4 baut auf der Darstellung in Abb. 4.1 auf. Zur Veranschaulichung sind zwei mögliche Lösungswege eingetragen, welche die Möglichkeiten dieses Instruments aufzeigen.

⁴⁵⁷ Grundlagen zum Aufbau und Umgang mit dem morphologischen Kasten vgl. Zwicky (1959); Rabl (2009).

⁴⁵⁸ Mehr dazu in Kapitel 4.2.1.

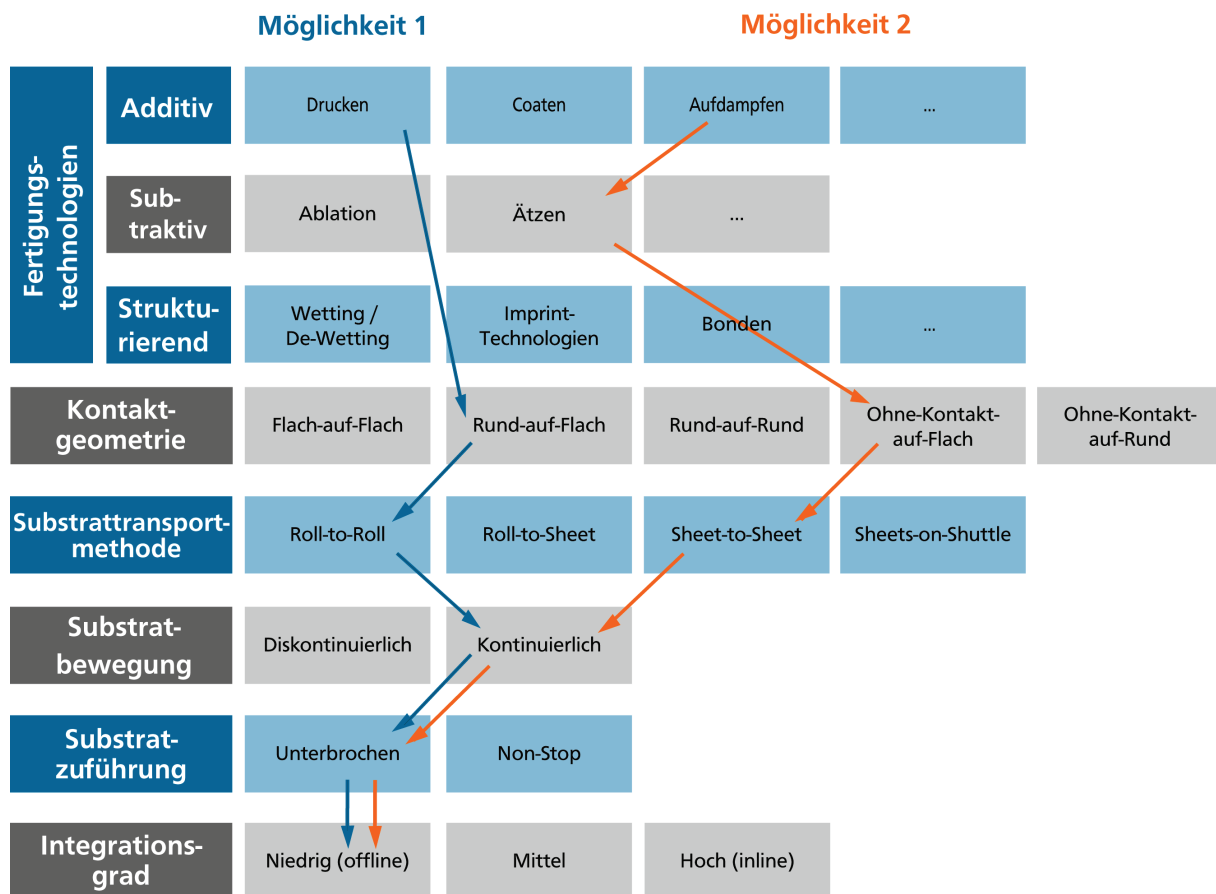


Abb. 4.4: Systematik substratbasierter Produktion. Eingetragen sind zwei mögliche Lösungswege.
Quelle: In Anlehnung an Willmann/Stocker/Dörsam (2012)

Die Darstellung der Systematik substratbasierter Produktion als morphologischen Kasten verdeutlicht die Anwendbarkeit dieser Systematik in der Praxis. Diese Darstellung kann als Hilfsmittel zur grundlegenden Auslegung einer substratbasierten Produktion eingesetzt werden. Sie stellt ein Hilfsmittel zur Ideenfindung neuer Konzepte für die Produktion druckbarer Elektronik dar.

4.2. Fertigungsverfahren als Teil der Produktion

Die Beschichtungsverfahren sind das zentrale Element der Fertigung von druckbarer Elektronik. Mit deren Hilfe können die Funktionsmaterialien gezielt auf das Substrat gebracht werden und somit Devices hergestellt werden. Aus diesem Grund liegt es nahe, die Beschichtungsverfahren näher zu untersuchen. Aus Sicht der Produktion sind vor allem zwei Aspekte der Beschichtungsverfahren von Bedeutung: Zum einen ist es notwendig das passende Verfahren für die jeweilige Situation herauszufinden. Dieser Frage wird in Kapitel 4.2.1 nachgegangen. Nach der Auswahl stellt sich zum anderen noch die Frage, welchen Einfluss die Beschichtungsverfahren auf die Auslegung einer Produktionsanlage für die druckbare Elektronik haben. Diese Untersuchung folgt in Kapitel 4.2.2.

4.2.1. Auswahl von Fertigungsverfahren

In der Literatur gibt es Beschreibungen, nach welchen Kriterien Fertigungsverfahren ausgewählt werden. So sprechen beispielsweise Westkämper und Warnecke (2010) von vier Oberkriterien, anhand derer die Fertigungsverfahren ausgewählt werden: produktbezogene Kriterien, verfahrensbezogene Kriterien, wirtschaftliche Kriterien sowie umwelttechnische und soziale Kriterien. Abb. 4.5 zeigt diese Oberkriterien und die dazugehörigen Unterkriterien. Dabei steht das zu fertigende Werkstück immer im Mittelpunkt.⁴⁵⁹ „Die verschiedenen Verfahrensvarianten werden unter Beachtung des gesamten sich jeweils ergebenden Fertigungsablaufs bewertet.“⁴⁶⁰

Diese Kriterien müssen für jeden Einzelfall priorisiert werden. Allerdings sind nicht alle erwähnten Kriterien quantifizierbar; diese können nur qualitativ bewertet werden. Ziel ist es, das unter Berücksichtigung der Randbedingungen optimale Fertigungsverfahren auszuwählen. Die hier aus der Literatur vorgestellte Systematik zur Auswahl von Fertigungsverfahren mit den vier Oberkriterien wird im folgenden Abschnitt auf die substratbasierte Fertigung adaptiert. So müssen viele der Kriterien im Detail für die Belange der druckbaren Elektronik spezifisch interpretiert werden. Weitere Kriterien, die für die druckbare Elektronik spezifisch sind, werden dieser Systematik hinzugefügt.

⁴⁵⁹ vgl. Westkämper/Warnecke (2010).

⁴⁶⁰ Westkämper/Warnecke (2010).

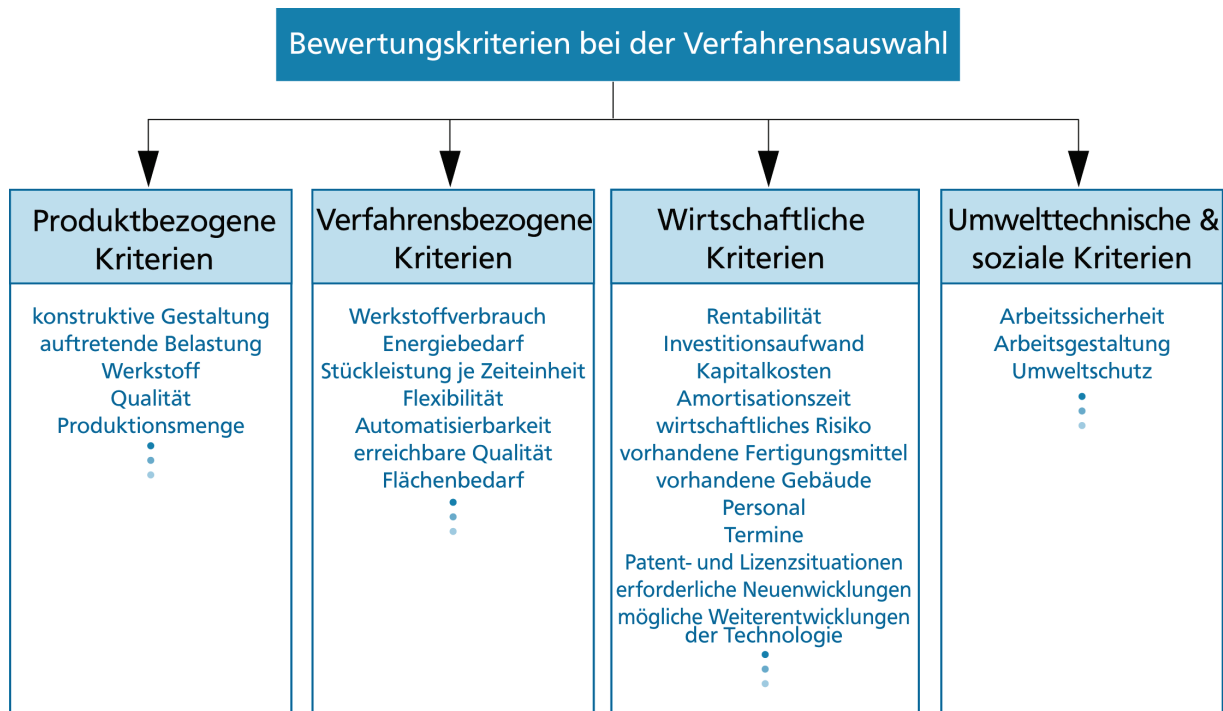


Abb. 4.5: Bewertungskriterien für die Auswahl von Fertigungsverfahren
 Quelle: In Anlehnung an Westkämper/Warnecke (2010)

Bei der Auslegung einer Produktion von druckbarer Elektronik stellt sich immer die Frage, mit welchen Verfahren die verschiedenen Schichten aufgebracht werden sollen. Im graphischen Druck wird eine Anlage meist nur mit Fertigungsverfahren gleichen Typs ausgestattet. So besitzen Offset-Druckmaschinen mehrere Offsetdruckwerke und Tiefdruckmaschinen mehrere Tiefdruckwerke, da die Druckfarben sehr ähnlich und aufeinander abgestimmt sind.⁴⁶¹ In der druckbaren Elektronik unterscheiden sich die Funktionsmaterialien sowie die Anforderungen an die unterschiedlichen Schichten teilweise erheblich, so dass nicht davon auszugehen ist, dass alle Schichten mit dem gleichen Verfahren herzustellen sind. Häufig existieren bereits Vorerfahrungen aus Laborversuchen, die eine gute Grundlage für die Auswahl des geeigneten Verfahrens darstellen. Bevor eine komplette Produktionsanlage mit viel Aufwand und Investitionen aufgebaut wird, gilt es zuvor den Prozess in Labormaßstab zu entwickeln. Voraussetzung für die Entwicklung des Prozesses sind Kenntnisse über das zu fertigende Device, das einzusetzende Material und den in Frage kommenden Fertigungsverfahren. Wie der Multi-Level-Ansatz (s. Abb. 3.8) zeigt,

⁴⁶¹ Ausnahmen sind beispielsweise Maschinen für Etikettendruck, bei denen traditionell verschiedenen Druckverfahren wie Offset, Tiefdruck, Flexodruck, Siebdruck oder Inkjet eingesetzt werden. Aber auch Standard-Bogenoffsetmaschinen werden inzwischen häufiger mit weiteren Druckverfahren ausgestattet um beispielsweise Lacke mit Flexodruckwerken oder Personalisierungen mit Inkjet drucken zu können.

kann der Prozess nicht isoliert betrachtet werden. Parallel zu der Prozessentwicklung müssen das Material und das Device-Layout mitentwickelt werden.

Für die druckbare Elektronik entwickelte Dörsam im Jahr 2004 einen **dreistufigen Laboraufbau**, mit dem der Upscaling-Prozess in drei Stufen durchgeführt wird. Das Konzept sieht vor, den Prozess von kleinsten Mengen bis hin zu produktionsnahen Bedingungen, zu entwickeln. Die Stufen sind so aufeinander abgestimmt, dass die Prozessparameter von der ersten Stufe auf die zweite Stufe und später dann auf die dritte Stufe adaptiert werden können. Abb. 4.6 zeigt symbolisch diesen Laboraufbau.⁴⁶²

Die **erste Stufe**⁴⁶³ sieht vor, mit Bedruckbarkeitsgeräten erste einfache Andruckversuche durchzuführen. Somit können unstrukturierte Flächen erzeugt werden, wodurch die Schichteigenschaften untersucht werden können. Der Vorteil dieser Bedruckbarkeitsgeräte ist, dass bereits erste Versuchsreihen mit geringen Fluid- und Substratmengen durchgeführt werden können. Es werden etwa 10 ml Funktionsfluid und kleine, max. DIN A5 große Substrate benötigt. Die Einstellmöglichkeiten der Maschinen sind allerdings eingeschränkt, so dass die Ergebnisse nur schwer auf einen industriellen Prozess übertragbar sind. So stehen für die Probedruckmaschinen auf Grund der geringen Größe der Druckzylinder nur eingeschränkte Druckformen zur Verfügung und die Registerabweichungen sind bei diesen Maschinen sehr groß.

Die **zweite Stufe**⁴⁶⁴ sieht Versuche auf Labordruckmaschinen mit Substratgrößen im Bereich von DIN A4 vor. Somit können erste Teststrukturen gedruckt werden, anhand derer die Funktion von Devices getestet werden können. Für aussagekräftige Versuchsreihen sind hier Fluidmengen im Bereich von wenigen 100 ml notwendig. Diese Versuche ermöglichen weitergehende Erkenntnisse über den Druckprozess, da die Druckmaschinen bereits deutlich näher an dem industriellen Prozess sind und alle notwendigen Einstellmöglichkeiten bieten. So können bei Druckmaschinen der zweiten Stufe auf ein breites Angebot unterschiedlicher Druckformen zurückgreifen und die Registerabweichungen sind deutlich geringer, als bei den Maschinen der ersten Stufe. Allerdings ist es nicht

⁴⁶² vgl. Dörsam (2010).

⁴⁶³ Die erste Stufe kann auch Bedruckbarkeit, printability oder proof-of-concept genannt werden.

⁴⁶⁴ Die zweite Stufe kann auch Labordruck, offline-printing oder rapid prototyping genannt werden.

möglich, Einflüsse durch kontinuierlichen Betrieb oder Bogenlauf zu untersuchen.

Die **dritte Stufe**⁴⁶⁵ ist eine produktionsnahe Umgebung, bei der die Versuche auf Produktionsmaschinen durchgeführt werden. In der dritten Stufe können bereits Demonstratoren in Kleinserien im Inline-Prozess hergestellt werden. Hierzu sind Fluidmengen im Litermaßstab und Substrate in Rollenware notwendig.⁴⁶⁶ Während die Versuchsreihen in der ersten und zweiten Stufe immer nur eine lokale Optimierung zulassen, ist in der dritten Stufe eine Optimierung auf den Gesamtprozess möglich.⁴⁶⁷ Die Maschinen der dritten Stufe lassen auch Rückschlüsse auf das Druckergebnis durch einen kontinuierlichen Betrieb zu.

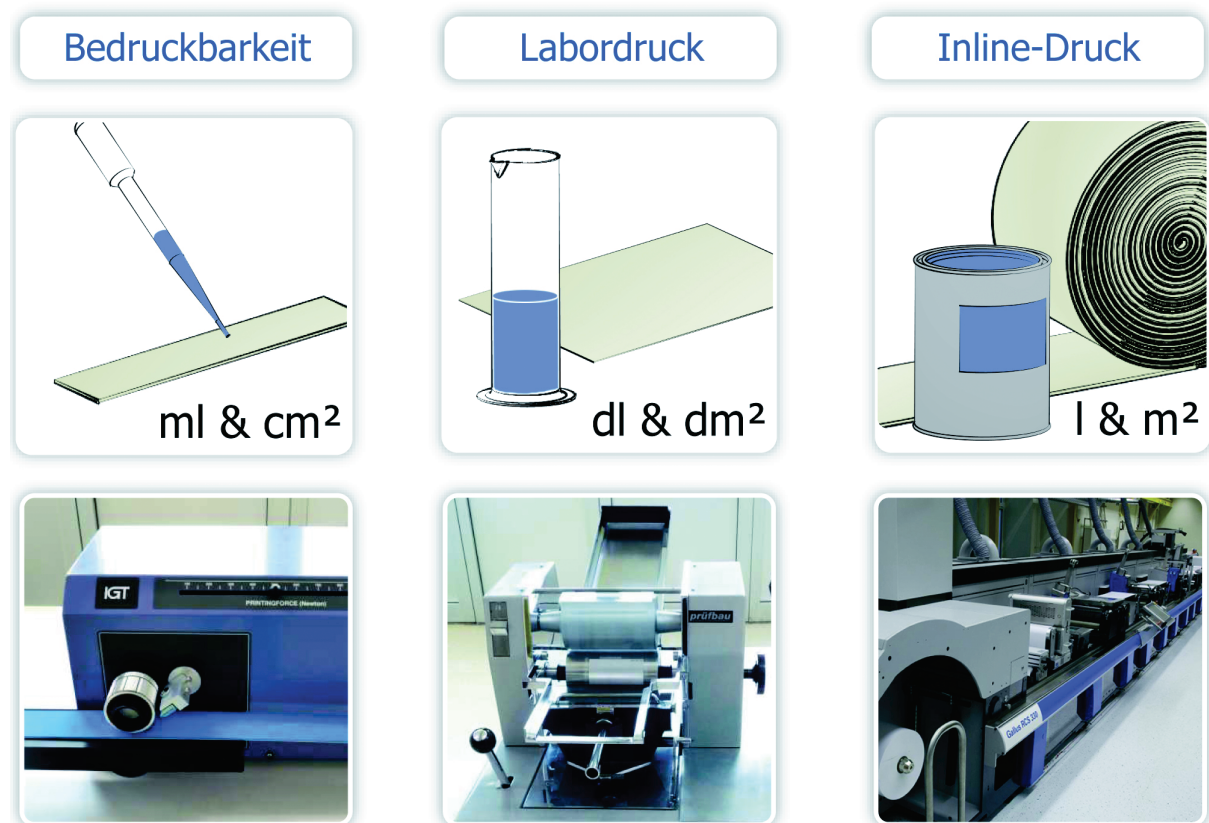


Abb. 4.6: Dreistufiger Aufbau des Drucklabors im Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt
Quelle: Dörsam (o. J.)

⁴⁶⁵ Die dritte Stufe kann auch Inline-Druck, inline-printing, continuous process printing oder proof of mass-production genannt werden.

⁴⁶⁶ Es sind auch Produktionsmaschinen der dritten Stufe denkbar, die Bogensubstrate verwenden.

⁴⁶⁷ vgl. Dörsam (2010); Dörsam (o. J.).

Allerdings lässt sich in diesem Stadium noch nicht von Massenproduktion sprechen, da die Maschinen der dritten Stufe zur Optimierung des Gesamtprozesses und nicht auf Massenproduktion ausgelegt sind. Zur Massenproduktion bedarf es weiterer Optimierung der Maschinen und der Logistikprozesse, so dass hier durchaus von einer **vierten Stufe** gesprochen werden kann.⁴⁶⁸

In der Literatur sind nur wenige Informationen über die Methodik zur Auswahl von Fertigungstechnologien und -verfahren für die druckbare Elektronik zu finden. Teschner beschreibt die Auswahl des Druckverfahrens für grafische Produkte und nennt dafür die folgenden Einflussfaktoren: Anforderungen des Produkts, Druckvorstufe, Druckmaschine, Bedruckstoffe, produktbezogene und prozessbezogene Qualität, Mitarbeiter und Wirtschaftlichkeit.⁴⁶⁹ In der Praxis kann allerdings einem Druckprodukt nicht eindeutig ein Druckverfahren zugeordnet werden. So können beispielsweise Zeitungen im Offset- und im Flexodruck hergestellt werden. Die Entscheidungen im graphischen Druck werden vielmehr nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten getroffen. Für die druckbare Elektronik ist es allerdings noch nicht klar, welche Ergebnisse die einzelnen Fertigungsverfahren erzielen. Krebs gibt einen Überblick über Druck- und Coating-Verfahren, die sich aus seiner Erfahrung für die Produktion von polymerbasierten Solarzellen eignen können. Er diskutiert deren Vor- und Nachteile, gibt aber keine Handlungsempfehlung zu dem Auswahlprozess eines Fertigungsverfahrens für einen beliebigen Prozess.⁴⁷⁰

Auf der technischen Betrachtung von Krebs baut Espinosa die Untersuchung auf, um mit einer Multikriterien-Analyse eine Antwort auf die Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens für organische Solarzellen zu geben. Da es keine Lösung gibt, die alle Anforderungen perfekt erfüllt, geht es darum, für die eigenen Präferenzen einen Kompromiss zu finden. Das Ergebnis der Untersuchung ist, dass die Verfahren Tiefdruck, Flexodruck, Offsetdruck, Inkjet, Curtain-Coating und Siebdruck am besten für die Produktion von Solarzellen geeignet sind.⁴⁷¹ Dieses allgemeingültige Ergebnis ist für eine direkte Umsetzung in der Praxis nicht geeignet. Die Auswahl des Verfahrens muss an einem realen Produkt auf die Schicht und das Material bezogen werden. Darüber hinaus

⁴⁶⁸ Die vierte Stufe kann auch Massenproduktion oder mass-prodcution genannt werden.

⁴⁶⁹ vgl. Teschner (2010).

⁴⁷⁰ vgl. Krebs (2009a).

⁴⁷¹ vgl. Espinosa u. a. (2010).

scheinen die Daten, die Espinosa der Analyse zu Grunde legt, dafür nicht geeignet zu sein. Zum einen sind die Größen Dimensionskontrolle, Anzahl der Schichten, Fluidvorbereitung sowie die gebundene Energie aus Sicht der Produktion wenig relevant. Zum anderen stimmen einige Werte aus der Untersuchung nicht mit den Ergebnissen und Erfahrungen des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt überein (s. hierzu Tabelle 4.2).

Daher wird im Folgenden eine eigene Systematik zur Auswahl von Fertigungsverfahren für die druckbare Elektronik erarbeitet. Aus Sicht der Produktion von druckbarer Elektronik gibt es vier Anforderungen an das Fertigungsverfahren: Das Device-Layout, die Fluid-Eigenschaften, die Prozess-Kompatibilität sowie die Wirtschaftlichkeit. Tabelle 4.1 zeigt die vier Anforderungen mit den jeweiligen Unterkategorien. Das Device-Layout stellt Anforderungen an die Nassfilmdicke und die Auflösung des Verfahrens, während die Viskosität des Fluids zu dem Verfahren passen muss. Aus Prozesssicht muss das Verfahren bezüglich der Geschwindigkeit und der Kompatibilität zum Substrattransport passen. Aus wirtschaftlichen Gründen müssen die gewählten Verfahren im Fluidverbrauch und im Durchsatz verglichen werden. Die Einflussgrößen werden in den folgenden Absätzen näher erläutert.

Tabelle 4.1: Einflussgrößen auf die Auswahl des Fertigungsverfahrens

Device-Layout		Fluid	Prozess-Kompatibilität		Wirtschaftlichkeit	
Nassfilmdicke	Auflösung	Fluid Viskosität	Geschwindigkeit	R2R-Kompatibilität	Durchsatz	Fluid Verbrauch

Darüber hinaus müssen prinzipiell auch das Substrat und die Funktion des Materials berücksichtigt werden. Diese spielen bei der Auswahl des Fertigungsverfahrens keine Rolle, wirken aber indirekt auf die Prozessierbarkeit und Funktion des Devices ein. Bei dem Auswahlprozess für ein Fertigungsverfahren für einen bestimmten Prozess müssen alle genannten Kriterien beachtet werden. Die Kriterien, bzw. die in Bezug auf diese Größen getroffene Auswahl, wirken ähnlich wie ein Filter, der aus der Gesamtmenge aller Fertigungsverfahren die passenden Verfahren herausfiltert. Der Vorgang ist in Abb. 4.7 dargestellt. Diese Abbildung macht deutlich, dass nur Verfahren eingesetzt werden können, die alle Anforderungen erfüllen.

Aus dem **Device-Layout** können für die Auswahl des Verfahrens zwei Kriterien abgeleitet werden: die gewünschte Schichtdicke des Materials sowie die mini-

male laterale Strukturgröße. Das Design des Devices gibt die zu erreichende *Schichtdicke* des Funktionsmaterials vor, damit die geplante Funktion erreicht werden kann. Aus dieser Trockenschichtdicke muss die Nassschichtdicke berechnet werden, die mit dem Fertigungsverfahren aufgetragen werden muss.

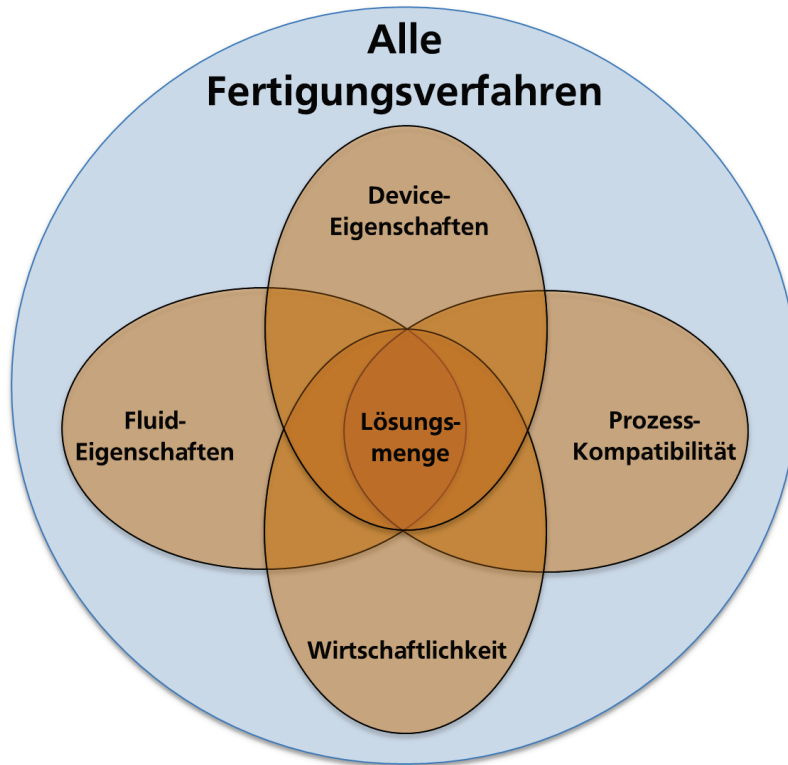


Abb. 4.7: Auswahl eines Fertigungsverfahrens nach dem Ausschlussprinzip. Es sind nur die Verfahren einsetzbar, die alle Anforderungen des Devices, des zu verarbeitenden Materials, des Prozesses und der Wirtschaftlichkeit erfüllen.

Die in den Funktionsfluiden enthaltenen Funktionsmaterialien sind mit Lösemittel in den flüssigen Zustand überführt worden, damit sie verarbeitet werden können. Auf dem Substrat bleibt nach dem Ausdampfen der Lösemittel nur das Funktionsmaterial, die so genannte Trockenschicht übrig. Somit lässt sich von der zu erreichenden Trockenschichtdicke $t_{trocken}$ über die Konzentration c $[0,1]$ ⁴⁷² des Funktionsmaterial in der Formulierung auf die zu erreichende Nassschichtdicke t_{nass} des Fertigungsverfahrens schließen.

$$t_{nass} = t_{trocken} \times \frac{1}{c} \quad \text{Formel 4.1}$$

⁴⁷² Die Konzentration kann zwischen Null und Eins liegen.

Übliche Nassschichtdicken liegen bei etwa 1 bis 8 μm . Je nach Fertigungsverfahren können diese auch davon abweichen. Darüber hinaus bestimmt das Device-Layout auch die erforderliche *Auflösung* des Verfahrens. So spielt hier beispielsweise die kleinste druckbare Linienbreite oder die kleinste druckbare Struktur eine Rolle. Für das Druckverfahren wird die Auflösung in Druckrichtung und quer zur Druckrichtung in Mikrometern angegeben. Bei der Auswahl in dieser Kategorie ist auch der minimale Linienabstand sehr wichtig, der vor allem beim Drucken von parallelen Leiterbahnen, wie den Source-Drain-Struktur eines OFETs, von Bedeutung ist. Auch die Randschärfe muss bei der Auswahl berücksichtigt werden, die allerdings nicht komplett durch die Auflösung beschrieben wird. Alle diese Größen wie minimale Strukturgröße, minimaler Linienabstand und Randschärfe werden hier unter Auflösung zusammengefasst.

Auch das zu verarbeitende **Druckfluid** spielt bei der Auswahl des Fertigungsverfahrens eine Rolle. So eignen sich die Fertigungsverfahren nur für Druckfluide, die in einem gewissen *Viskositätsbereich* liegen. Als extreme Beispiele seien hier das Offset- und das Inkjet-Verfahren genannt. Während beim Offset-Druck nur sehr pastöse Fluide mit einer hohen Viskosität von 2 bis 100 Pa s zum Einsatz kommen, können bei dem Inkjet-Verfahren vor allem dünnflüssige Fluide mit einer Viskosität von 0,002 bis 0,025 Pa s eingesetzt werden.

Konnte ein Fertigungsverfahren gefunden werden, welches die ersten drei Parameter Nassfilmdicke, Auflösung und Fluid-Viskosität erfüllt, ist es möglich eine funktionierende Schicht zu drucken. Wurden für alle Schichten ein Verfahren gewählt, können damit Devices hergestellt werden. Für eine Produktion müssen die Fertigungsverfahren allerdings noch weitere Anforderungen erfüllen. Diese Kriterien werden in dem folgenden Abschnitt vorgestellt.

Die **Prozess-Kompatibilität** beschreibt die Eigenschaft der Verfahren in einen Produktionsprozess integriert werden zu können. Hierfür sind der nutzbare *Geschwindigkeitsbereich* und die Kompatibilität zu den Substrattransport-Methoden von Bedeutung. Da unter Umständen für jede aufzubringende Schicht ein anderes Fertigungsverfahren eingesetzt wird, ist es wichtig, dass diese Verfahren mit dem optimalen Geschwindigkeitsbereich übereinstimmen, da das Substrat unter normalen Umständen mit gleicher Geschwindigkeit durch alle Druckwerke befördert wird. Für jedes Verfahren gibt es in Kombination mit

Funktionsfluid und Substrat einen optimalen Geschwindigkeitsbereich. Diese sollten bei hintereinander angebrachten Druckverfahren aufeinander abgestimmt werden.⁴⁷³ Mit der Kompatibilität gegenüber *Substrattransportmethoden* ist vor allem der Rollentransport gemeint. Wie Tabelle 4.2 zeigt, eignen sich fast alle Verfahren der Flüssigphasenprozessierung für ein Rollensubstrat. Einige wenige Verfahren wie Photolithographie und Softlithographie sind für ein kontinuierlich bewegtes Substrat nicht geeignet. Diese lassen sich in Rollensubstratanlagen durch ein diskontinuierlich bewegtes Substrat integrieren.⁴⁷⁴ Allenfalls das Spin-Coating-Verfahren lässt sich unter keinen Umständen in einen Rollenprozess integrieren, da hier das Substrat mit hoher Geschwindigkeit rotiert. Aus verfahrenstechnischer Sicht sind die wichtigsten Einflussparameter beschrieben, so dass die Funktionsfluide mit einem der passenden Fertigungsverfahren zu einer funktionierenden Schicht auf einer Fertigungsanlage verarbeitet werden können.

Für eine erfolgreiche Produktion müssen aber auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden. Zu den **wirtschaftlichen Aspekten** gehören der Durchsatz und der Fluid-Verbrauch. Der *Durchsatz* beschreibt die Menge an produzierten Devices, welche in einer bestimmten Zeit die Produktionsanlage verlässt. Der Durchsatz wird in Output pro Zeit (Anzahl Devices pro Stunde) angegeben. Bei organischen Solarzellen wäre eine Angabe in Wattpeak W_p pro Zeit die exaktere Größe, da die von der Solarzelle generierbare Energie neben der Fläche vor allem auch von deren Effizienz abhängt. Bei OFETs beispielsweise hängt die Menge der produzierten Devices pro Fläche auch von der Integrationsdichte ab. Je kleiner die Strukturen gefertigt werden können, desto mehr Devices können auf einer definierten Substratfläche hergestellt werden. Näherungsweise kann der Output mit der bedruckten Fläche beschrieben werden. Folglich wird der Durchsatz von der Breite des Substrats und der Geschwindigkeit, mit der das Substrat durch die Produktionsanlage bewegt wird, bestimmt. Aus wirtschaftlicher Sicht gilt es, die gewinnmaximale Fertigungsmenge zu bestimmen. Aus Produktionssicht bedeutet dies, dass eine höhere Kapazität einer Produktionsanlage tendenziell mehr verkaufbare Produkte ermöglicht und somit auch einen höheren Ertrag. Dieser Ertrag muss den Mehrkosten der Produktionsanlage mit höherer Kapazität gegengerechnet werden. Der *Fluidverbrauch* eines Ferti-

⁴⁷³ Oder durch andere prozesstechnische Anpassungen der Fertigung kompensiert werden. S. hierzu Kapitel 4.1

⁴⁷⁴ Verweis auf das Kapitel 4.1

gungsverfahren beschreibt die Menge an Druckfluid, die aufgewendet werden muss, um eine definierte Fläche bei festgelegter Schichtdicke auf einem Substrat zu beschichten. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, lohnt ein sehr sparsamer Umgang mit den teuren Funktionsmaterialien. Vor allem subtraktive Verfahren wie Laserablation oder Photolithographie verschwenden wertvolles Funktionsmaterial, in dem ein Teil des zuvor aufgetragenen Druckfluids wieder entfernt wird. So spielt nicht nur die Menge eine Rolle, die auf das Substrat aufgebracht wird, sondern auch die Fluidmengen, die beispielsweise in Speicherbehältern oder Dosiereinrichtungen gespeichert werden und nach einem erneuten Rüsten einer Anlage nicht mehr verwendet werden können. Dieses Totvolumen sollte so gering wie möglich sein.

Die einzelnen Schritte des Auswahlprozesses sind in Abb. 4.8 als Ablaufplan dargestellt. Diese Darstellung kann als Leitfaden gesehen werden, der zeigt, in welchen Schritten der Auswahlprozess durchlaufen werden muss.

Somit kann nun ein passendes Verfahren für eine aufzubringende Schicht gewählt werden. Nach Auswahl des Fertigungsverfahrens muss die Rückkopplung zum Device-Layout erfolgen. Danach kann das Device-Layout genau an die Bedingungen des Fertigungsverfahrens angepasst werden, um ein optimales Ergebnis zu erhalten.⁴⁷⁵ Der beschriebene Auswahlprozess wird gegebenenfalls in mehreren Iterationsschritten erfolgen, bis das geeignete Verfahren gefunden ist. Aus diesem Grund bietet sich das zuvor beschriebene dreistufige Konzept an, damit die Versuche schnell und günstig durchgeführt werden können. Der Auswahlprozess muss nun für jede Schicht, die aufgebracht werden soll, einzeln durchgeführt werden.

Die für den Auswahlprozess notwendigen Informationen, sind in Tabelle 4.2 für die wichtigsten Fertigungsverfahren für die druckbare Elektronik dargestellt. Die Fertigungsverfahren wurden dabei in vier Kategorien aufgeteilt: Coating-Verfahren, Druckverfahren, Strukturierungsverfahren sowie subtraktive Verfahren.⁴⁷⁶ Die Tabelle 4.2 stellt die in Tabelle 4.1 beschriebenen Einflussgrößen für die Auswahl des Fertigungsverfahrens dar: Nassfilmdicke, Auflösung, Fluid Viskosität, Geschwindigkeit, R2R-Kompatibilität, Durchsatz und Fluidverbrauch.

⁴⁷⁵ vgl. Stahl (2009).

⁴⁷⁶ vgl. Kapitel 2.2.1.

Für die Werte Nassfilmdicke, Auflösung, Fluid Viskosität und Geschwindigkeit sind zum Teil nicht nur ein Wert, sondern ein Bereich angegeben. Die eine Zahl gibt den Wert an, der heute bereits mit Produktionsmaschinen erreicht wird. Der bessere Wert sagt etwas über das Potential des Fertigungsverfahrens aus heutiger Sicht aus.

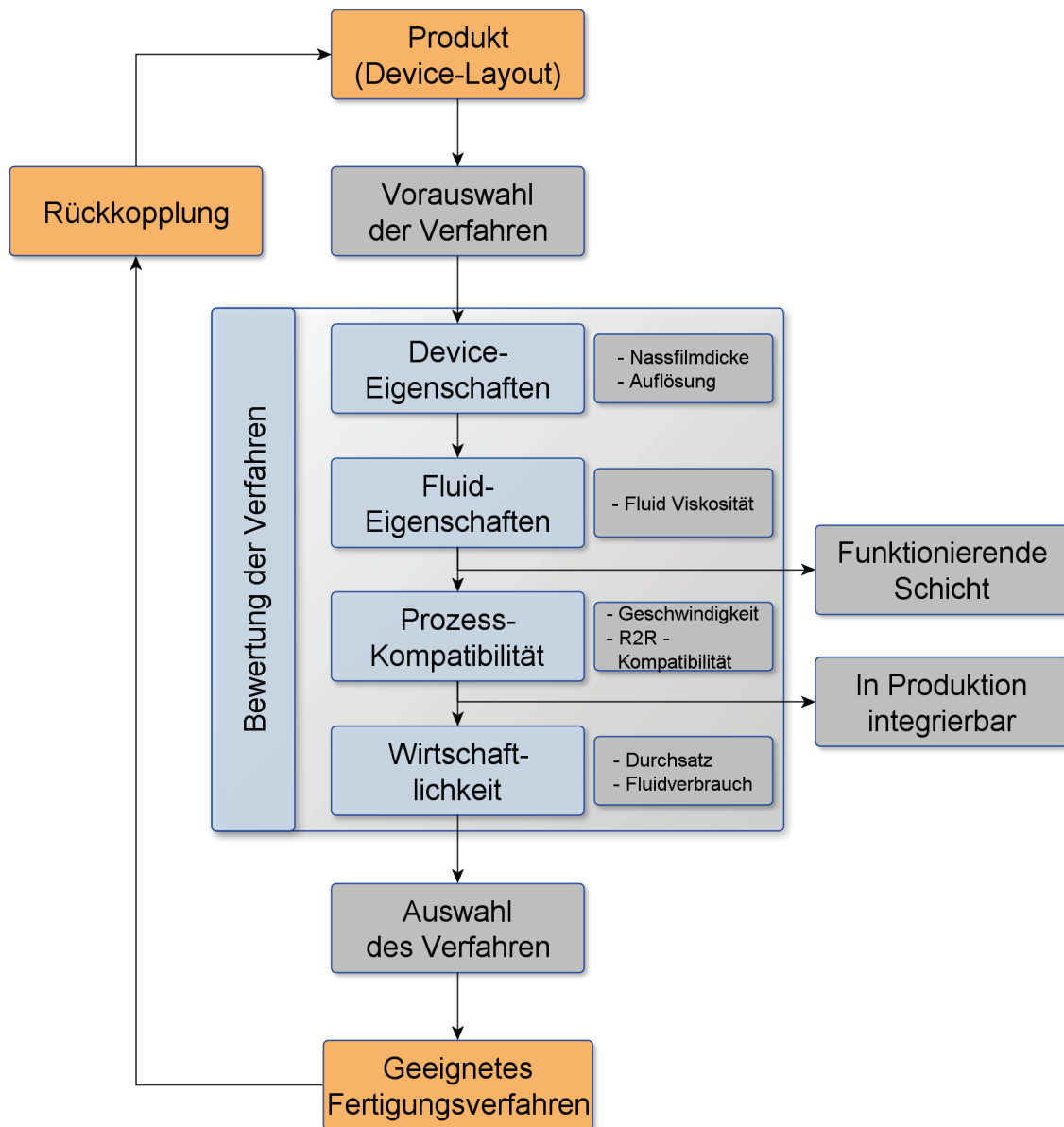


Abb. 4.8: Ablaufplan zur Auswahl eines Fertigungsverfahrens zur Herstellung von funktionalen Schichten

Die Werte für Durchsatz beschreiben den maximalen Durchsatz von bereits existierenden Maschinen, die diese Fertigungsverfahren einsetzen. Dieser Wert ist kein berechneter Grenzwert, so dass mit den aufgelisteten Verfahren noch produktivere Maschinen denkbar sind, indem die Geschwindigkeit oder die Ma-

schinenbreite erhöht wird. Die Tabelle basiert neben eigenen Forschungsergebnissen und Erfahrungen und denen des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt auf den folgenden Quellen:

Clemens u. a. (2012)⁴⁷⁷, Stahl (2009)⁴⁷⁸, Krebs (2008)⁴⁷⁹, Krebs (2010)⁴⁸⁰, Gamota u. a. (2004)⁴⁸¹, Hübler u. a. (2002)⁴⁸² und Espinosa u. a. (2010)⁴⁸³.

Tabelle 4.2: Matrix mit Einflussgrößen von ausgewählten Fertigungsverfahren

	Device-Design		Fluid	Prozess-Kompatibilität		Wirtschaftlichkeit	
	Nassfilm- dicke	Auflösung	Fluid Viskosität	Geschwindigkeit	R2R-Kom- patibilität	Durchsatz	Fluid Verbrauch
	μm	μm	Pa*s	m/min		m ² /h	Mengenabhängig
Coaten							
spin coating	< 100	n.a.	< 10	n.a.	nein	niedrig	signifikant
blade coating	< 100	n.a.	0,01 - 40	1 - 100	ja	niedrig	einiges
spray coating	1 - 500	n.a.	100 - 1.000	1 - 100	ja	n.a.	einiges
knife-over-edge ~	20 - 700	n.a.	0,05 - 100	1 - 100	ja	5.000	sehr wenig
meniscus coating	5 - 500	> 1.000	10 - 1.000	1 - 100	ja	n.a.	wenig
curtain coating	5 - 500	> 1.000	0,015 - 2	10 - 1000	ja	100.000	sehr wenig
slide coating	25 - 250	> 1.000	0,01 - 300	1 - 1000	ja	100.000	sehr wenig
slot die coating	10 - 500	> 1.000	0,01 - 300	1 - 1000	ja	50.000	sehr wenig
Drucken							
flexo printing	0,5 - 5	10 - 50	0,005 - 0,5	1 - 1000	ja	130.000	sehr wenig
soft lithography	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	diskonti- nuierlich	niedrig	sehr wenig
gravure printing	1 - 20	2 - 50	0,005 - 0,2	20 - 1000	ja	250.000	sehr wenig
offset printing	0,5 - 3	10 - 30	2 - 100	20 - 1000	ja	130.000	wenig
screen printing	5 - 500	10 - 100	5 - 100	1 - 100	ja	10.000	sehr wenig
inkjet printing	0,1 - 5	15 - 100	0,002 - 0,025	1 - 100	ja	10.000	sehr wenig
aerosoljet	n.a.	5 - 15	n.a.	n.a.	ja	n.a.	sehr wenig
gravure offset	5 - 250	> 20	0,05 - 0,2	20 - 1000	ja	250.000	sehr wenig
hot stamping	n.a.	> 50	n.a.	0,05 - 130	ja	7.600	signifikant
Strukturieren							
wetting/de-wetting	n.a.	1 - 20	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
imprint technologies	0,01	0,02 - 20	1.000.000	n.a.	ja	3,5	signifikant
Subtraktiv							
laser ablation	n.a.	1 - 100	n.a.	n.a.	ja	n.a.	signifikant
photolithography	n.a.	0,022 - 10	n.a.	n.a.	diskonti- nuierlich	12 - 48	signifikant
etching							

⁴⁷⁷ vgl. Clemens u. a. (2011).

⁴⁷⁸ vgl. Stahl (2009).

⁴⁷⁹ vgl. Krebs (2009a).

⁴⁸⁰ vgl. Krebs (2010).

⁴⁸¹ vgl. Gamota u. a. (2004).

⁴⁸² vgl. Huebler u. a. (2002).

⁴⁸³ vgl. Espinosa/Garcia-Valverde/Krebs (2011).

Abb. 4.9 sortiert einige ausgewählte Fertigungsverfahren nach der minimal erreichbaren Linienbreite und der Produktionsgeschwindigkeit. So weisen beispielsweise die konventionellen Druckverfahren eine sehr hohe Produktionsgeschwindigkeit auf, erreichen aber eher schlechte Auflösungen. Mit Verfahren, wie der Soft Lithographie oder der Nanostrukturierung wiederum können sehr feine Strukturen erzeugt werden, aber diese Verfahren sind vergleichsweise langsam. Daraus wird deutlich, dass bis heute keine Verfahren existieren, die bei minimaler Strukturgröße hohe Produktionsgeschwindigkeiten zulassen. So scheinen zwei Wege möglich: Zum einen können Produkte der druckbaren Elektronik sehr schnell und günstig, aber wenig leistungsfähig hergestellt werden. Zum anderen können Produkte langsam und folglich nicht günstig, aber dafür deutlich leistungsfähiger hergestellt werden. Denkbar ist auch eine Mischung von leistungsfähigen und weniger leistungsfähigen Prozessen in einer Produktionsanlage, um somit die Vorteile beider zu kombinieren.

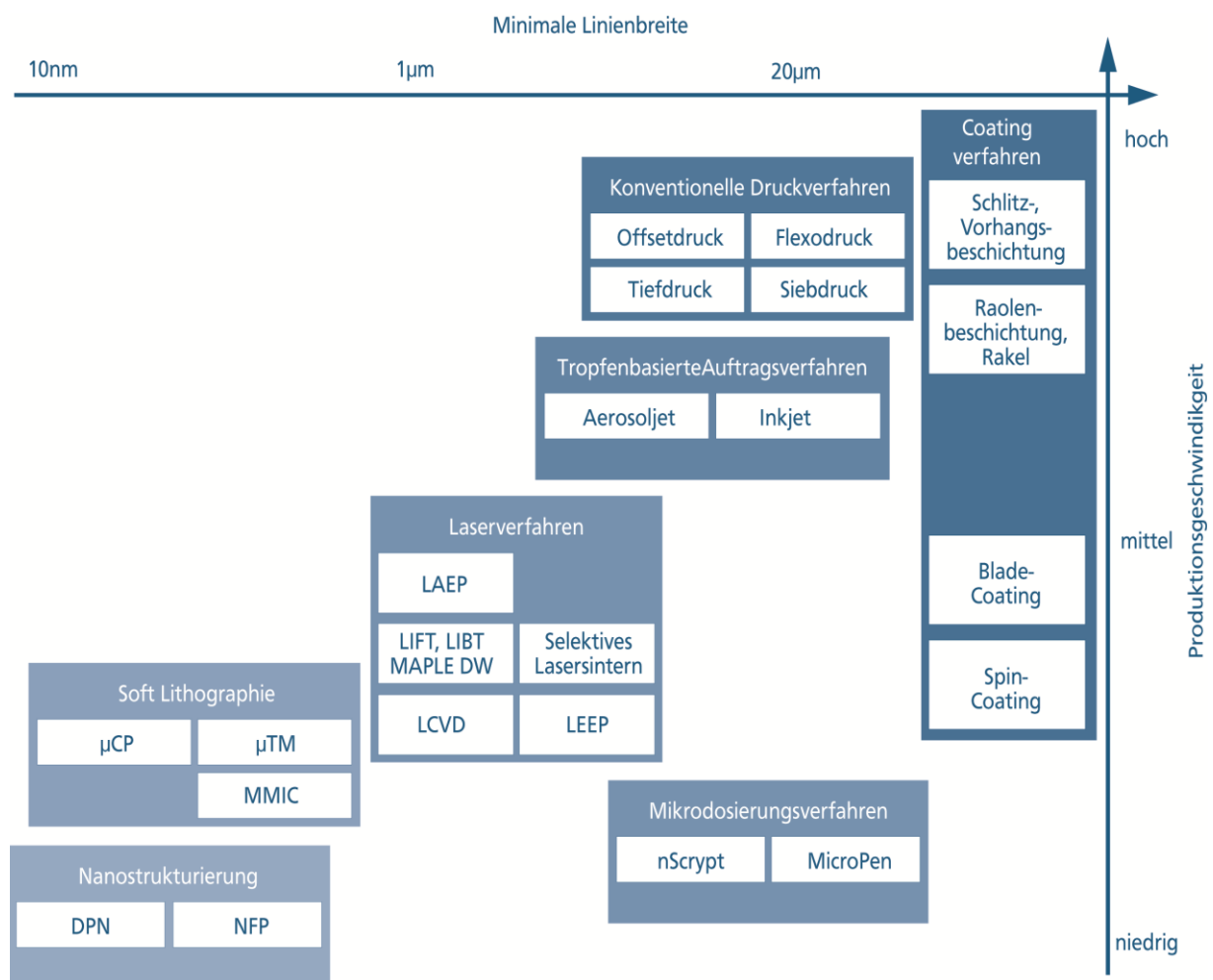


Abb. 4.9: Fertigungsverfahren - sortiert nach der minimalen Linienbreite und Produktionsgeschwindigkeit
Quelle: In Anlehnung an Stahl (2009)

4.2.2. Weitere Aspekte von Fertigungsverfahren in der Produktion

Ziel dieses Abschnitts ist, den Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Auslegung einer Produktion von druckbarer Elektronik zu untersuchen. Für diese Betrachtung werden die Verfahren, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, nach dem Umgebungsdruck unterschieden: Einsatz von Vakuum-Verfahren und Einsatz von vakuumlosen Verfahren. Der Schwerpunkt liegt auch in diesem Kapitel auf den vakuumlosen Verfahren.

Vakuum-Verfahren

Durch die notwendige Evakuierung des Prozessraums unterscheidet sich der Prozess deutlich von dem Druckprozess. Um ein Vakuum zu erzeugen, bedarf es eines evakuierbaren Gehäuses um das Substrat und die Materialquelle. Dieses Gehäuse muss groß genug für das Substrat, das Target⁴⁸⁴ und gegebenenfalls die Energiequelle wie Heizung oder Ionenstrahlquelle sein. Die Einhausung sollte allerdings so klein wie möglich sein, damit die Zeit für das Evakuieren reduziert werden kann. Aus diesem Grund kommen bei Aufdampfverfahren meist Bogensubstrate zum Einsatz. Werden bei Aufdampfverfahren Rollensubstrate eingesetzt, muss die komplette Substratrolle inklusive Ab- und Aufrollung in die Vakuumkammer eingebracht werden. Das zu evakuierende Volumen ist dadurch deutlich größer. Der Aufwand der Einhausung sowie der Evakuierung des Gehäuses bedeuteten gegenüber der Beschichtung aus der Flüssigphase deutlich höhere Investitionskosten für einen Unterdruckbehälter dieser Größe und die notwendige Evakuierungstechnik. Darüber hinaus steigen auch die Betriebskosten, da die Pumpen zum einen viel Energie benötigen und zum anderen auch den Wartungsaufwand erhöhen.

Der Prozess enthält, abweichend zu dem in Kapitel 3.1 dargestellten Prozess, zusätzlich folgende Prozessschritte: Vorbereiten und Beladen der Vakuumkammer, Evakuieren und Spülen der Vakuumkammer, Beschichten des Substrats, Belüften und Öffnen der Vakuumkammer sowie Entnahme der beschichteten Substrate. Diese zusätzlichen Prozessschritte erhöhen die Durchlaufzeit eines Substrates gegenüber einer Prozessierung aus der flüssigen Phase deutlich. Trotz hoher Automatisierung benötigt der Evakuierungsprozess sehr viel Zeit. Abhängig von dem zu evakuierenden Volumen, den eingesetzten Pumpen

⁴⁸⁴ Target wird das in Form gepresste Rohmaterial genannt. Dieses gilt es zu zerstäuben, um es auf das Substrat abscheiden zu können. Target wird auch Schichtmaterial genannt.

und dem zu erreichenden Vakuum kann dieser Prozess von unter einer Minute bis zu einigen Tagen dauern.⁴⁸⁵ Eine weitere Herausforderung ist das Ausgasen von Foliensubstraten. Aufgrund des geringeren Dampfdrucks kommt es zum Ausgasen von Wasser, absorbierten Gasen oder Lösemittel. Diese Rückstände müssen über die Vakuumpumpen entfernt werden und verlängern somit die Zeit der Vakuumerzeugung. Darüber hinaus können diese Rückstände den Aufdampfprozess stören.⁴⁸⁶

Der Pumpprozess kann zeitlich optimiert werden, indem Schleusen eingesetzt werden. Dadurch muss die Vakuumkammer nicht immer komplett evakuiert werden, sondern nur die meist deutlich kleinere Schleuse. Zum anderen kann während des Aufdampfprozesses die Schleuse gleichzeitig evakuiert werden, so dass hier Zeit gespart wird. Trotz allem bleibt die Dauer für das Rüsten einer Anlage, die aus der Gasphase beschichtet, sehr hoch gegenüber einer Anlage, die aus der Flüssigphase beschichtet. Neben der Zeit, die für das Erstellen des Vakuums benötigt wird, sind die Beschichtungszeiten bei Aufdampfverfahren deutlich länger als bei den Druckverfahren. Die Zeit für das Beschichten beim Aufdampfen hängt von dem eingesetzten Verfahren, dem Material und der zu erreichenden Schichtdicke ab. Dieser Vorgang kann von wenigen Sekunden bis mehreren Minuten dauern. Beim Beschichten von Glas mit ITO in einer Sputteranlage werden mittlere Depositionsraten von etwa 90 nm/min⁴⁸⁷ auf Bogen substraten und etwa 100 nm bei einer Geschwindigkeit von 1 m/min bei Foliensubstraten auf einer Rolle erreicht.⁴⁸⁸ Die Abscheiderate von Aufdampfanlagen für organische kleine Moleküle ist geringer und hängt von Material, Substrat, Vakuum und zu erzielender Schichtqualität ab.⁴⁸⁹

Um die Bearbeitungszeit des Aufdampfprozesses mit dem Drucken zu vergleichen, müssen die fertigen Schichten verglichen werden. Hierzu kann es nach dem Aufdampfprozess noch notwendig sein, dass die Schichten nachbehandelt werden müssen. Die Zeit des Beschichtungsvorgangs beim Drucken hängt von der Geschwindigkeit des Substrats und der Systemgrenze ab. Die Geschwindigkeiten liegen je nach Prozess bei bis zu 17 m/s. Aus heutiger Sicht hingegen liegen die Prozessgeschwindigkeiten in etwa bei 1 m/s. Dadurch ergibt sich ei-

⁴⁸⁵ vgl. Mattox (2010); Engers/Bauer (1999).

⁴⁸⁶ vgl. Mattox (2010).

⁴⁸⁷ vgl. Bräuer (1999).

⁴⁸⁸ vgl. Fahland (2009).

⁴⁸⁹ vgl. McGeehee (2012).

ne Bearbeitungszeit von maximal einer Sekunde.⁴⁹⁰ Bis zum fertigen Trockenfilm müssen noch die Schritte der Schichtabscheidung und der Nachbehandlung durchlaufen werden. Je nach Material und anderen Randbedingungen kann der Prozess von unter einer Sekunde bis zu mehreren Minuten dauern. Die Rüstzeiten und die Bearbeitungszeiten sind somit für Vakuumverfahren höher als bei der Beschichtung aus der flüssigen Phase. Somit erhöht sich bei Vakuumverfahren zum einen die Durchlaufzeit und zum anderen sinkt der Durchsatz einer solchen Anlage.

Die nach der *Systematik substratbasierter Produktion*⁴⁹¹ vorgestellte Variante einer ununterbrochenen Produktion scheint hingegen aus heutiger Sicht mit einem Vakuumverfahren nur schwer realisierbar. Um einen solchen Non-Stop-Prozess durchzuführen, müssen die neuen Substratrollen in die Vakuumkammer eingeschleust werden und die beschichteten Substratrollen ausgeschleust werden. Eine endgültige Aussage zum Einfluss von Vakuum-Verfahren auf die Produktion druckbarer Elektronik scheint in diesem Umfeld sehr schwierig, da es heute noch nicht absehbar ist, welche Innovationen bezüglich der vakuumbasierten Fertigung zu erwarten sind.

Vakuumlose Verfahren

Einige ausgewählte Nicht-Vakuum-Verfahren wurden bereits in Kapitel 2.2.1 vorgestellt. Diese Verfahren benötigen keine evakuierte Umgebung und können ohne weitere Einhausung in eine Produktionsanlage integriert werden. Ein Aspekt, der einen Einfluss auf die Produktionsanlage hat, ist die Unterscheidung der Fertigungsverfahren nach dem Zusammenhalt.⁴⁹² Während additive Verfahren wie Tiefdruck oder Slot-Die-Coating nur einen Prozessschritt benötigen, sind für subtraktive und strukturierende Verfahren zwei Prozessschritte notwendig. Daher müssen zwei Prozessschritte in die Anlage integriert werden.

Ein weiterer Punkt, der auf seinen Einfluss auf die Produktion untersucht werden sollte, ist die Unterscheidung der Fertigungsverfahren nach Kontakt bzw. kontaktlosen Verfahren. Verfahren, wie Tief- oder Flexodruckverfahren, die während des Druckens mit dem Substrat in Kontakt kommen, haben zum einen Einfluss auf den Substrattransport und zum anderen auf die darunter liegende Schicht. Für den Transport des Substrates bedeutet dies, dass bei einem Rollen-

⁴⁹⁰ Zur Berechnung wurde die Länge des Druckwerks mit einem Meter angenommen.

⁴⁹¹ vgl. Kapitel 4.1

⁴⁹² vgl. Kapitel 2.2.1

substrat die Substratbahn durch die Pressung zwischen dem Druckformzylinder und dem Gegendruckzylinder beeinflusst werden kann. Bei einem Bogensubstrat können Greifer in die Zylinder eingebaut werden, die das Substrat fördern. Die Möglichkeit der Kontrolle der Substratbahn über diese Klemmstelle ist bei Ohne-Kontakt-Verfahren wie Inkjet in einer Rollenmaschine nicht möglich.

Ein Hinweis für diese Aussagen liefern die zwei Druckmaschinen der dritten Stufe des Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt: GALLUS RCS 330-HD und KBA MePrint Premium. Bei beiden Druckmaschinen handelt es sich um Versuchsdruckmaschinen, welche produktionsnahe Versuche zulassen. Abb. 4.10 zeigt die beiden Maschinen. Die RCS 330-HD ist eine Rollendruckmaschine, die ursprünglich im Etikettendruck eingesetzt wird. Diese Maschine ist mit Druckwerken folgender Verfahren ausgerüstet: Flexodruck, Offsetdruck, Rotations-Siebdruck, Tiefdruck und Inkjet. Bei der KBA MePrint Premium handelt es sich um eine Maschine, welche ursprünglich zum Bedrucken von CDs konzipiert wurde. Aus diesem Grund nutzt diese Maschine die Substrattransportmethode Sheets-on-Shuttle. Diese Maschine wurde an die Anforderungen der druckbaren Elektronik angepasst. So wurden zum Beispiel weitere Druckverfahren integriert, so dass die Ausstattung folgende Verfahren umfasst: Flachbett-Siebdruck, wasserloser Offsetdruck, Flexodruck und Tiefdruck.



Abb. 4.10: Druckmaschinen der 3. Stufe des Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) der TU Darmstadt. Linke Seite: Gallus RCS 330-HD. Rechte Seite: KBA MePrint Premium
Quelle: Dörsam (o. J.)

Beide Maschinen zeigen, dass es ohne großen Aufwand möglich ist, unterschiedliche additive Verfahren in eine Maschine zu integrieren. An den Maschinen und an dem Substrattransport musste nichts geändert werden. Die verschiedenen Druckwerke wurden auf die vorhandenen Schnittstellen der Maschinen aufgebaut. Dabei spielte es keine Rolle, ob Verfahren mit Kontakt (Tiefdruck) oder ohne Kontakt (Inkjet) installiert wurden. In diese beiden Maschinen wurde allerdings bisher noch kein Verfahren mit zwei Prozessschritten wie subtraktive und strukturierende Verfahren integriert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Auswahl eines Fertigungsverfahrens innerhalb der Gruppe der vakuumlosen Verfahren keinen großen Einfluss auf die Auslegung einer Produktionsanlage der druckbaren Elektronik hat. Die Auslegung einer Produktionsanlage wird aber maßgeblich von der Substrattransportmethode bestimmt, welche in dem folgenden Kapitel im Detail untersucht wird.

4.3. Einfluss der Substrattransportmethode auf die Produktion

Die Substrattransportmethode ist das zentrale Element einer Anlage der substratbasierten Produktion. Wie aus Kapitel 3.3 zu entnehmen ist, wird das Design einer Produktionsanlage in erster Linie von der Substrattransportmethode bestimmt. Die Substrattransportmethode kann innerhalb einer Produktionsanlage nur mit erheblichem Aufwand verändert werden, der mit einem Neubau der Anlage vergleichbar ist. Somit kann die Entscheidung für eine Substrattransportmethode nicht ohne großen Kostenaufwand rückgängig gemacht werden. Im Gegensatz dazu kann beispielsweise ein einzelnes Fertigungsverfahren mit relativ wenig Aufwand getauscht werden. Somit muss eine Entscheidung für eine Substrattransportmethode so getroffen werden, dass diese auch Veränderungen am Markt und in der Technologie mittragen kann.

In zahlreichen Industrien werden hochspezialisierte Technologien zum Transport von Substraten eingesetzt. Während bei der Displayproduktion das Glassubstrat durch die Fabrik transportiert werden muss, wird in der Produktion graphischer Erzeugnisse das Papier oder die Folie durch die Druckmaschine geführt.⁴⁹³ Für diese Anforderungen wurden unterschiedliche Transportmethoden entwickelt und optimiert. Für die noch sehr junge Technologie der druckbaren Elektronik wurde noch keine Optimierung des Substrattransports durchgeführt, da bisher die Substrate noch nicht festgelegt und die Anforderungen nicht definiert sind.

In dem folgenden Abschnitt 4.3.1 werden deshalb zunächst die Anforderungen einer Produktion von druckbarer Elektronik an den Substrattransport beschrieben. In Kapitel 4.3.2 werden vier Methoden für den Substrattransport beschrieben. Im darauf folgenden Kapitel 4.3.3 werden Kriterien vorgestellt, anhand derer eine Bewertung von Substrattransportmethoden durchgeführt werden kann.

⁴⁹³ vgl. Willmann u. a. (2012).

4.3.1. Anforderungen der druckbaren Elektronik an Substrate und deren Transport

Die Anforderungen der druckbaren Elektronik an den Substrattransport lassen sich nicht allgemeingültig beschreiben, da sich die Anforderungen für die jeweiligen Applikationen wie OPV, OLED und OFET unterscheiden.

Organische Solarzellen sind permanent dem Wetter und der Sonne ausgesetzt, so dass das Substrat in erster Linie bestimmte Schutzeigenschaften besitzen muss. Es muss der UV-Strahlung widerstehen und die empfindlichen organischen Funktionsmaterialien vor eindringender Luft und Feuchtigkeit schützen. Je nach Aufbau einer Solarzelle⁴⁹⁴ dringt das Licht durch das Substrat in die aktive Schicht, so dass das Substrat so lichtdurchlässig wie möglich sein sollte. Aspekte wie Lichtreflexion und Transmission des Substrats haben einen Einfluss auf die Energieeffizienz der Solarzelle. Da Solarzellen in erster Linie großflächig eingesetzt werden sollen, müssen die Substrate in großen Abmessungen vorliegen. Ein Vorteil der organischen Photovoltaik liegt darin, dass diese auf flexiblen Substraten aufgebracht werden können. Das bedeutet für den Substrattransport, dass große und flexible Substrate befördert werden müssen. Da mehrere Schichten übereinander gedruckt werden, muss der Substrattransport dazu in der Lage sein, das Substrat so exakt zu transportieren, dass diese Schichten registerhaltig übereinander aufgebracht werden können. Da es sich bei Solarzellen um relativ große Flächen handelt (die kleinste Kantenlänge ist mindestens einige Zentimeter lang)⁴⁹⁵, liegen die Anforderungen an die Registergenauigkeit bei unter einem Millimeter.

Die Anforderungen der **OLED**-Applikationen sind denen der OPV sehr ähnlich, da es sich hierbei auch in erster Linie um große aktive Flächen auf starren oder flexiblen Substraten handelt. Allerdings ist der Bedarf an den Schutz der aktiven Halbleiterschichten gegen Degradierung sowie die ästhetischen Anforderungen bei OLEDs höher. Die Anforderungen an die Registergenauigkeit liegen ähnlich wie bei OPV bei unter einem Millimeter.

Die Anforderungen an den Substrattransport für Applikationen mit **organischen Transistoren** unterscheiden sich deutlich von den oben genannten.

⁴⁹⁴ vgl. Kapitel 2.1.1

⁴⁹⁵ vgl. Krebs/Tromholt/Jorgensen (2010).

Während einzelne OPV- oder OLED-Devices bereits verkaufbare Halbzeuge darstellen, kann ein einziger Transistor allein keinen Nutzen generieren. Transistoren müssen hierfür zu einer logischen Schaltung verknüpft werden. Für einfache Schaltungen sind mindestens einige Hundert bis einige Tausenden Transistoren notwendig.⁴⁹⁶ Dafür müssen die Leistungsdaten aller Einzeltransistoren sehr ähnlich sein, damit die Schaltung funktioniert. Die Leistungsfähigkeit von Transistoren hängt unter anderem auch von der Kanallänge ab. Um solche kleine Strukturen erzeugen zu können, muss der Substrattransport sehr exakt sein, da sehr kleine Strukturen genau übereinander gedruckt werden müssen. Der Halbleiter muss beispielsweise genau in den Kanal gedruckt werden und die Gate-Elektrode sollte auch exakt zwischen die Source- und Gate-Elektrode gedruckt werden. Für den OFET lässt sich also sehr schwer eine genaue Angabe für das Register machen, da klar ist, umso besser das Register, desto kleiner kann der Transistor werden und desto leistungsfähiger wird die Schaltung. Aus heutiger Sicht wird eine Kanallänge von unter 10 μm angestrebt.⁴⁹⁷

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Aufgabe des Substrattransports der Transport eines Substrates mit definierter Geschwindigkeit und Genauigkeit ist. Die Anforderungen an den Substrattransport der druckbaren Elektronik sind sehr unterschiedlich und hängen von dem zu produzierenden Produkt ab.

4.3.2. Substrattransportmethoden

In diesem Kapitel werden die vier Methoden für den Substrattransport beschrieben, die bereits in Abb. 4.1 als eine der sechs Komponenten der Systematik substratbasierter Produktion vorgestellt wurden:

- 1) Roll-to-Roll - Transport
- 2) Sheet-to-Sheet - Transport
- 3) Sheets-on-Shuttle - Transport
- 4) Roll-to-Sheets - Transport

Diese Transportmethoden werden nach der Form des Substrats unterschieden. Die Verfahren werden in dieser Untersuchung zunächst unabhängig von den eingesetzten Substraten, den eingesetzten Fertigungsverfahren und Maschinen

⁴⁹⁶ vgl. Kapitel 2.1.3

⁴⁹⁷ vgl. Kapitel 2.1.3

betrachtet. Im Einzelfall müssen auch diese Punkte betrachtet werden. Die einzelnen Methoden werden anhand von Druckmaschinen näher erläutert, können aber auch für andere Einsatzzwecke eingesetzt werden.

Um die einzelnen Substrattransportmethoden näher untersuchen zu können, müssen zunächst die **Anforderungen an den Substrattransport** betrachtet werden. Aus ökonomischer Sicht ist vor allem eine hohe Produktivität⁴⁹⁸ von Bedeutung. Der Substrattransport hat auf die Produktivität entscheidenden Einfluss, da hier vor allem die maximal zu transportierende Substratbreite und Substratgeschwindigkeit relevant sind. Darüber hinaus bestimmt auch die möglichst exakte Positionierbarkeit zum einen die Qualität der Produkte und zum anderen auch die Wirtschaftlichkeit mit.⁴⁹⁹ Der Substrattransport sollte ein möglichst einfaches und wirtschaftliches Substrathandling⁵⁰⁰ zulassen, sowie eine konstante Geschwindigkeit ermöglichen. Eine konstante Geschwindigkeit reduziert die Effekte auf Grund geschwindigkeitsabhängiger und schlupfabhängiger Phänomene. Bei der druckbaren Elektronik dürfen die empfindlichen Funktionsfluide und Schichten nicht kontaminiert werden, so dass bereits bei dem Substrattransport auf Reinheit geachtet werden muss.

4.3.2.1. Roll-to-Roll - Transport (R2R)

Der Roll-to-Roll - Transport ist geprägt von einer kontinuierlichen Substratbahn, welche auf einer Rolle aufgewickelt vorliegt. Abb. 4.11 zeigt den schematischen Aufbau einer Rollendruckmaschine der graphischen Industrie. Diese Rolle wird in der Produktionsanlage eingespannt und die Substratbahn in die Anlage eingezogen. Die Methode wird im Folgenden anhand von Druckmaschinen näher erklärt. Bei den meisten Rollendruckmaschinen verläuft die Substratbahn horizontal. Bei Zeitungsdruckmaschinen verläuft die Substratbahn vertikal. Der Abwickler klemmt die Substratbahn zwischen zwei Walzen, bringt die Kraft reibschlüssig auf die Substratbahn auf und beschleunigt das Substrat und somit die Substratrolle auf Maschinengeschwindigkeit. Danach fährt die Substratbahn durch die Druckwerke, in denen das Substrat ein- oder beidseitig bedruckt werden kann. Nach dem Bedrucken werden die Farben mit Heißluft, UV- oder Infrarot-Strahlung getrocknet. Die erhitzte Substratbahn wird je nach

⁴⁹⁸ vgl. Kapitel 2.2.1. Zur Definition von Produktivität der druckbaren Elektronik vgl. Kapitel 4.3.3.4.

⁴⁹⁹ vgl. Kapitel 2.2.2

⁵⁰⁰ vgl. Kapitel 4.4.4

Konfiguration danach wieder gekühlt. Abschließend kann das Substrat wieder aufgerollt werden oder in der gleichen Maschine direkt weiterverarbeitet werden. Da in den wenigsten Fällen eine bedruckte Substratrolle verkauft wird, wird das Substrat zum gewünschten Format zugeschnitten, gefalzt, geheftet oder geklebt.

Auf dem Markt haben sich viele spezielle Varianten von Rollendruckmaschinen entwickelt. Zum Beispiel Maschinen mit Zentralzylinder, bei denen alle Druckwerke gegen einen sehr großen Gegendruckzylinder drucken, oder Zeitungsdruckmaschinen, bei denen mehrere Substratbahnen parallel bedruckt werden, die später dann zu einem Produkt weiterverarbeitet werden.⁵⁰¹ Dafür muss das Substrat unter Spannung gehalten werden, damit es kontrollierbar bleibt. Die Herausforderung dabei ist die Einhaltung des Registers, da hierfür keine mechanischen Anschläge wie beim Bogentransport zur Verfügung stehen. Um das Seitenregister einzuhalten, muss die Bahn mit Leitwalzen gesteuert werden. Um das Längsregister einzuhalten, muss die Bahn immer eine definierte Spannung aufweisen und die Geschwindigkeit der Bahn relativ zur Geschwindigkeit der Druckzylinder geregelt werden. Auf Grund des bei großen Anlagen bis zu mehreren Dutzend Meter eingespannten Substrats, welches mit der Spannung beaufschlagt wird, kommt es zur Dehnung im Substrat, welches zu einer Verlängerung und Einschnürung der Bahn führt.⁵⁰² Ein Vorteil der Roll-to-Roll-Technologie ist die einfache Transportmethode, welche relativ günstige Maschinen erlaubt. Ein weiterer Vorteil sind die hohen Bahngeschwindigkeiten von bis zu 17 m/s⁵⁰³ und die breiten Substrate von bis zu 4,38 m⁵⁰⁴, die eine hohe Produktivität ermöglichen. Durch die kontinuierliche Farbabgabe auf das Substrat stellt sich ein beständiger Prozess ein, der als Gleichgewichtsprozess angesehen werden kann. Da bei dem Rollentransport kein Greifersystem eingesetzt wird, entfällt der bei Bogenmaschinen notwendige Kanal, was für bestimmte Druckverfahren Vorteile hat, da die Oberfläche des Druckzylinders einheitlich geschlossen ist.

⁵⁰¹ vgl. Schnabel (2009).

⁵⁰² vgl. Quel (2004).

⁵⁰³ vgl. Meder/Wandji (2009).

⁵⁰⁴ vgl. Quel (2004).

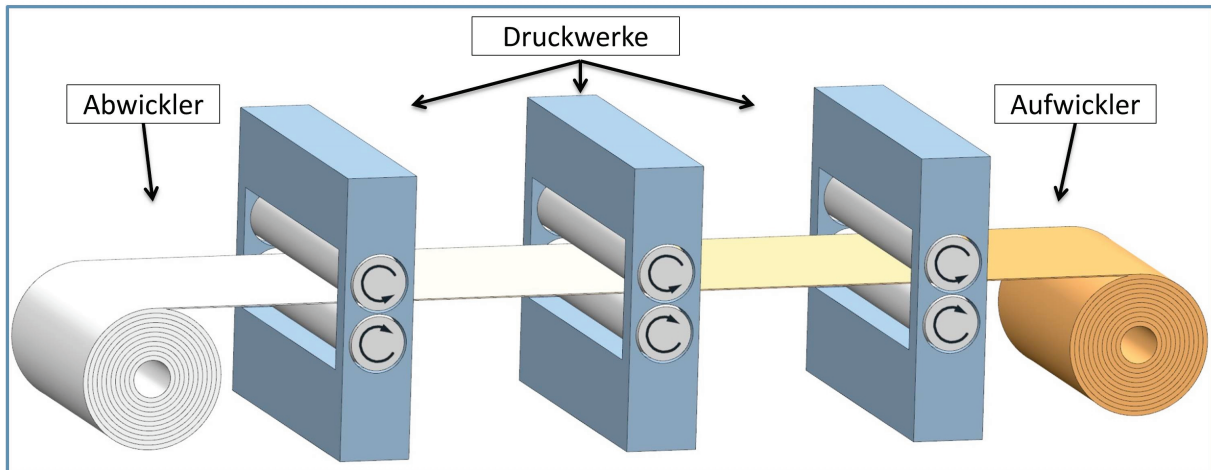


Abb. 4.11: Skizze der Substrattransportmethode Roll-to-Roll
Quelle: Willmann/Stocker/Dörsam (2012)

4.3.2.2. Sheet-to-Sheet - Transport (S2S)

Bei dem Sheet-to-Sheet Transport liegt das Substrat als Bogen vor. Das Substrat ist meistens flexibel, wie zum Beispiel Papier oder Folie. Es kann auch als starres und somit biegesteifes Material vorliegen, zum Beispiel als Metall- oder Glas-Substrate. Abb. 4.12 zeigt den schematischen Aufbau einer Bogendruckmaschine.

Die Bogensubstrate werden über den Anleger der Maschine zugeführt. Meist liegen die Substrate als Anlagestapel vor und werden von dem Stapel vereinzelt und dann als Schuppenstrom auf dem Bogentisch der Maschine zugeführt. Die Bogen werden an der vorderen und einer Seitenkante mit Ziehmarken ausgerichtet, um dann von einem Greifersystem des ersten Druckzylinders gegriffen und auf Maschinengeschwindigkeit beschleunigt zu werden. Die Bogen werden durch den Druckspalt und dann zum Transferzylinder und zu weiteren Druckwerken transportiert. Nach dem letzten Druckwerk werden die Bogen von einem Kettengreifersystem durch den Trockner befördert. Die Greifer geben die Bogen kurz vor dem Ablagestapel frei. Die Bogen werden abgebremst und auf dem Stapel abgelegt.⁵⁰⁵

Der Vorteil des Bogentransports ist vor allem in der großen Substratvariabilität zu sehen. In einer Druckmaschine können viele Substrate unterschiedlicher Größe, Dicke und Materialien verarbeitet werden. Die Genauigkeit bezüglich des Registers ist bei den heutigen Bogendruckmaschinen höher als bei Rollen-

⁵⁰⁵ vgl. Kipphan (2001).

druckmaschinen. Zum einen kommen deutlich kleinere Substrate zum Einsatz, deren Dehnungen in Längs- und Querrichtung kleiner ist. Nach dem Ausrichten jedes Substrats werden die Substrate immer durch die Greifer durch die Maschine transportiert, so dass die Substrate permanent geführt werden. In aktuellen Bogendruckmaschinen werden Abweichungen im Anlageregister⁵⁰⁶ von unter 5 μm erreicht.

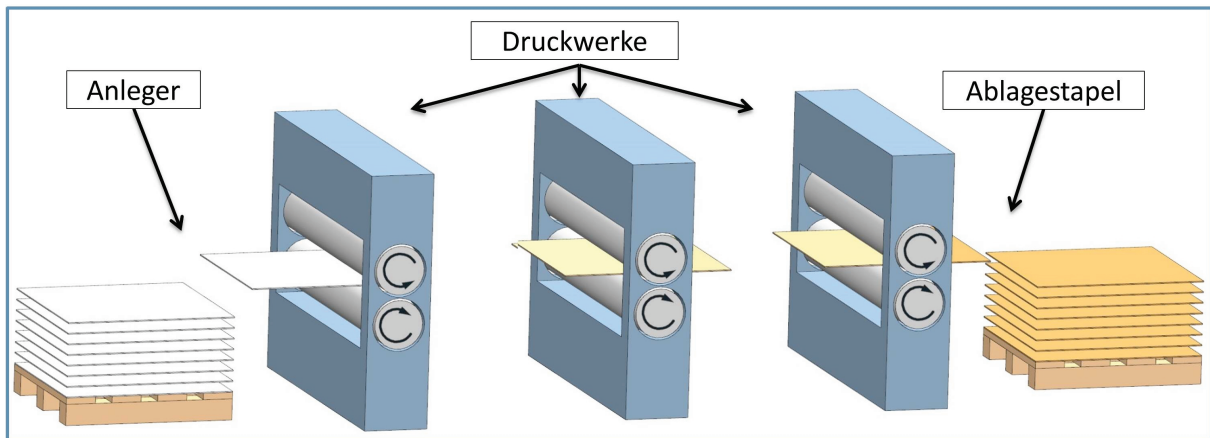


Abb. 4.12: Skizze der Substrattransportmethode Sheet-to-Sheet
Quelle: Willmann/Stocker/Dörsam (2012)

Durch das Bogenkonzept ist die Flexibilität in solchen Anlagen deutlich höher, da einzelne Produktionsschritte mit relativ wenig Aufwand auf andere Maschinen ausgelagert werden können. Darüber hinaus lässt das Bogenkonzept auch zu, dass Makulatur direkt noch in der Maschine aussortiert werden kann und somit teure nachgelagerte Arbeitsschritte vermieden werden können.

Der Bogentransport ist sehr aufwendig und benötigt eine sehr komplexe Greiferkinematik. Die Produktivität wurde in den letzten Jahren durch Verbreiterung des Substrats und Steigerung der Druckgeschwindigkeit stetig erhöht. Die Produktivität konnte darüber hinaus vor allem durch weitere Automatisierung gesteigert werden. Die maximale Druckgeschwindigkeit von Rollenmaschinen von 17 m/s können Bogenmaschinen nicht erreichen. Bogenmaschinen erreichen aktuell eine Druckgeschwindigkeit von 5,5 m/s. Auch die maximale Substratbreite ist bei den aktuellen Bogendruckmaschinen deutlich geringer. Wäh-

⁵⁰⁶ Anlageregister ist die Abweichung in der Überdrückung von Maschinendurchlauf zu Maschinendurchlauf. Im Vergleich dazu sagt das Übergaberegister etwas über die Abweichung in der Überdrückung von Druckwerk zu Druckwerk innerhalb einer Maschine aus. Vgl. Kapitel 2.2.2.

rend Rollenmaschinen Substratbreiten bis zu 4,32 m verarbeiten, sind die größten Bogen etwa 2,05 m breit.⁵⁰⁷

4.3.2.3. Sheets-on-Shuttle - Transport (Shuttle-Transport)

Bei der Substrattransportmethode Sheets-on-Shuttle wird das Substrat auf einem Shuttle⁵⁰⁸ fixiert und so mithilfe des Shuttles durch die Maschine transportiert. Das Shuttle ist dabei meist ein stabiles Trägermedium, welches im Allgemeinen wieder verwendet werden kann. Damit ermöglicht das Shuttle eine Bewegung des Substrats, ohne es durch den Transport zu belasten. Somit können auch sehr empfindliche Substrate schnell und sicher transportiert werden. Beispiele für empfindliche Substrate sind DVDs, Blue Rays, Glas, Wafer und dünne Folien. Das Shuttle-Prinzip wird aber auch in anderen Bereichen eingesetzt. In der Logistik werden solche Lösungen selbstfahrende Werkstückträger genannt.⁵⁰⁹ So wird das Shuttle-Prinzip von der Firma Eisenmann AG, Böblingen für flexible Tauchfördersysteme für Karossen in der Automobilindustrie eingesetzt.⁵¹⁰ Der Shuttle-Transport wird bereits in der druckbaren Elektronik von der Firma Plastic Logic verwendet. In deren Produktion werden die Folien-substrate auf Glas aufgebracht, welches hier als Shuttle dient.⁵¹¹

Abb. 4.15 zeigt den schematischen Aufbau einer Druckmaschine mit Shuttle-Transport. Der Prozess startet mit der Entnahme eines einzelnen Substrats von einem Substratvorrat. Dieses Substrat wird auf dem Shuttle positioniert, ausgerichtet und fixiert um danach auf Maschinengeschwindigkeit beschleunigt zu werden. Für die Verbindung zwischen Shuttle und Maschine sind viele Lösungen denkbar. In heutigen Maschinen wird unter anderem bereits der Transport mit Förderbändern, mit Schienensystemen, mit Zahnstange und Zahnrad oder mit elektronischer Welle⁵¹² angewendet. In Druckmaschinen mit Shuttle-System werden die Shuttles durch die Druckwerke transportiert. Die Druckwerke sind ohne Gegendruckzylinder ausgerüstet, da das Shuttle dessen Funktion

⁵⁰⁷ Diese Breite entspricht dem Bogenformat 9, welches von der Druckmaschine KBA Rapida 205 verarbeitet wird.

⁵⁰⁸ Für diese Transportmethode existieren noch weitere Bezeichnungen. In der Produktion werden Shuttles auch Träger oder Werkstückträger genannt. Im englischen Sprachgebrauch wird noch der Ausdruck Sheets on Carrier genutzt.

⁵⁰⁹ vgl. Corban (2009); Hübler/Nendel/Dombeck (2011).

⁵¹⁰ vgl. Scheller (2012).

⁵¹¹ vgl. Plastic Logic Ltd (2012).

⁵¹² Eine elektronische Welle koppelt mehrere elektrische Antriebe und bildet somit die Funktion einer mechanischen Welle nach.

übernimmt. Dabei handelt es sich um das Druckprinzip Rund auf Flach.⁵¹³ Danach können die Shuttles durch beliebige andere Bearbeitungsstationen bewegt werden. Am Ende des Prozesses müssen die Substrate von dem Shuttle entnommen werden. Um die Shuttles nun wieder einsetzen zu können, müssen diese zum Anfang des Prozesses, der Bestückung, transportiert werden. Konsequenterweise werden solche Anlagen als Kreislauf konstruiert. Dadurch reduzieren sich die Transportwege. Durch den Einsatz von mehreren Shuttles hintereinander reduziert sich die Leerlaufzeit und ein kontinuierlicher Materialfluss im Druckwerk ist möglich.

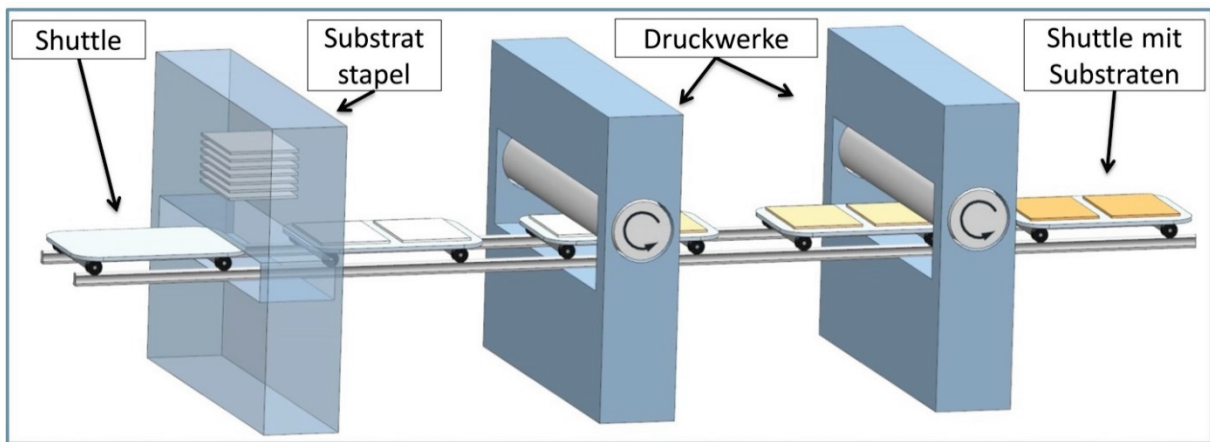


Abb. 4.13: Skizze der Substrattransportmethode Sheet-to-Sheet
Quelle: Willmann/Stocker/Dörsam (2012)

In Abb. 4.14 ist das Schema einer Druckmaschine dargestellt, welche die Substrate mit Shuttles durch die Maschine transportiert. Diese Skizze basiert auf der KBA Premium, welche von dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt für die druckbare Elektronik modifiziert wurde. Unter 1) ist der Anleger zu sehen, der die bereitgestellten Substrate zu den Shuttles transportiert und die Substrate auf den Shuttles ausrichtet. Die Shuttles bewegen sich in dem Bereich zwischen dem letzten Druckwerk 5) und dem ersten Druckwerk 2) getaktet, so dass die Shuttles eine kurze Zeit still stehen. In dieser Zeit wird das Substrat von dem Anleger ausgerichtet. Daraufhin wird das Substrat mit einer definierten Taktanzahl zum ersten Druckwerk transportiert. Durch den Takt ist es möglich auch diskontinuierliche Prozesse wie beispielsweise Flachbettsiebdruck in diese Maschine zu integrieren. Für die darauf folgenden Druckwerke mit Offset-, Flexo- und Tiefdruck werden die Shuttles mit-

⁵¹³ vgl. Kapitel 4.1

tels Zahnrad-Zahnstangen-Kombination mit kontinuierlicher Geschwindigkeit fortbewegt. Nach dem letzten Druckwerk 5) werden die Shuttles wieder im Takt bis zum Ausleger 6) transportiert. Der Ausleger entnimmt die bedruckten Substrate und stapelt diese.

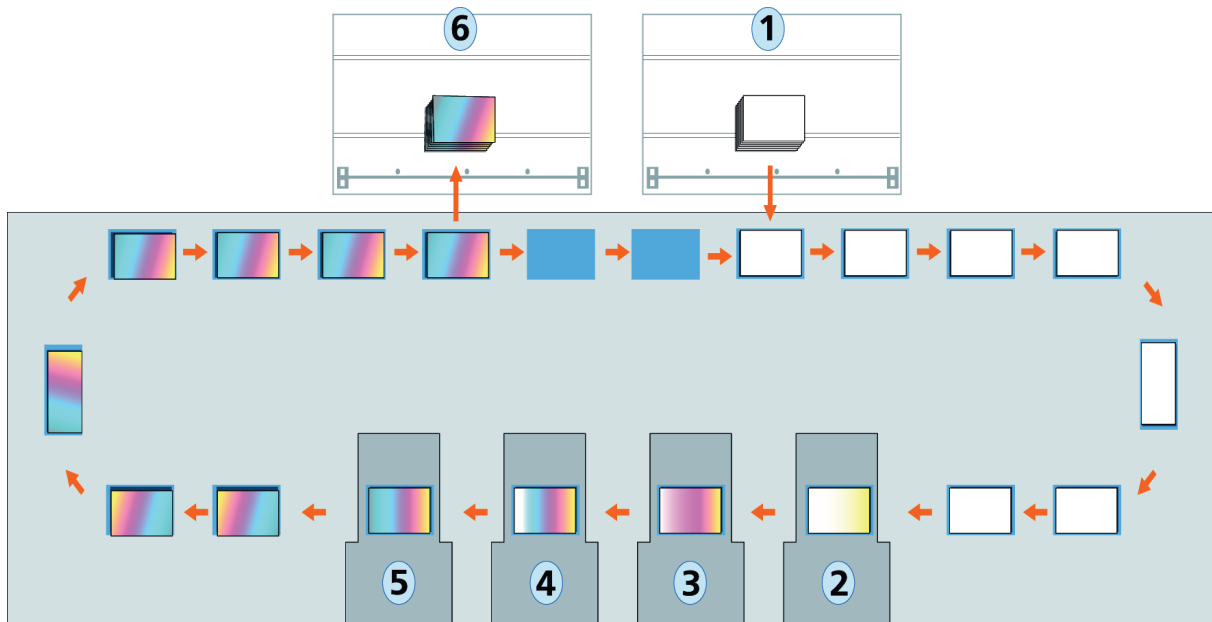


Abb. 4.14: Skizze einer auf Shuttle-Transport basierenden Druckmaschine KBA Premium.
1) Anleger, 2) bis 5) Druckwerke und 6) Ableger

Der Vorteil des Shuttle-Transports liegt darin, dass viele unterschiedliche Arten, vor allem auch sehr empfindliche Substrate, transportiert und sehr exakt positioniert werden können. Außerdem kann dieses Verfahren mit sehr vielen Bearbeitungstechnologien wie Drucken, Aufdampfen oder subtraktiven Verfahren kombiniert werden. Die Nachteile des Verfahrens sind vor allem die bei den aktuellen Maschinen limitierte Substratgröße⁵¹⁴ sowie die geringe Geschwindigkeit des Systems.

4.3.2.4. Hybride Transportmethoden wie Roll-to-Sheets - Transport (R2S)

Unter der hybriden Transportmethode wird eine beliebige Kombination aus den ersten drei Substrattransportmethoden verstanden. Bis heute sind nur wenige Kombinationen solcher hybriden Transportmethoden in der Industrie im Ein-

⁵¹⁴ Bis heute gab es keine Notwendigkeit solche Maschinen mit großen Shuttles zu bauen. Aus technischer Sicht spricht nichts dagegen, die Shuttles größer auszulegen. In der Displayproduktion werden heute bereits Glassubstrate bis zu einer Größe von 2,88 x 3,13 m² (Gen 10) verarbeitet. Vgl. Corning (o. J.).

satz.⁵¹⁵ In der graphischen Industrie gibt es Maschinen, die das Substrat als Rollenware zuführen, aber das Substrat als Bogen durch die Maschine transportieren. Diese Roll-to-Sheets Maschinen werden aus wirtschaftlichen Gründen eingesetzt, da für bestimmte Anwendungen Rollensubstrate deutlich günstiger als Bogensubstrate sind. Die Firma Winkler & Dünnebier GmbH aus Neuwied baut beispielsweise Maschinen, die mit einer Papierrolle bestückt werden, um daraus fertige bedruckte und geklebte Briefumschläge herzustellen.

Allerdings gibt es einige Branchen, die spezifische Varianten von Roll-to-Sheets einsetzen und die Kombination Rollen- und Bogensubstrat zum Standard oder sogar zum Kern deren Geschäftsmodells gehört. In der Elektronikfertigung kommen diskrete elektronische Bauteile häufig vom Gurt, um auf einzelne Platinen übertragen zu werden. Im Verpackungsdruck werden bestimmte Elemente wie RFID-Antennen als Halbzeuge auf einer Rolle geliefert, um auf das bogenartige Substrat übertragen zu werden. Abb. 4.15 zeigt den schematischen Aufbau einer Druckmaschine mit Roll-to-Sheet-Transport. Daraus wird deutlich, dass der Prozess ähnlich dem des Bogentransports ist. Der Unterschied besteht darin, dass das Substrat nicht als Stapel, sondern als Rolle vorliegt. Diese Rolle wird auf Maschinengeschwindigkeit beschleunigt und dann zu Bogen zugeschnitten.

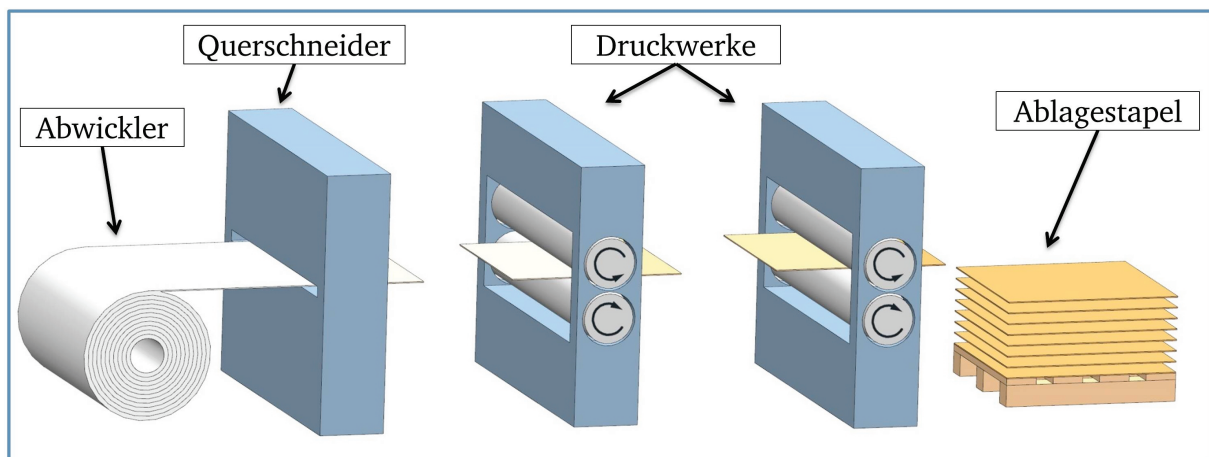


Abb. 4.15: Skizze der Substrattransportmethode Roll-to-Sheets
Quelle: Willmann/Stocker/Dörsam (2012)

⁵¹⁵ Je nach Betrachtungsweise können auch alle Rollendruckmaschinen, die Zeitungen oder Zeitschriften produzieren, zu dieser Gruppe gezählt werden. Diese Maschinen drucken auf Rollensubstraten, welche direkt nach dem Druckvorgang in der gleichen Anlage zu Bogen zugeschnitten und zu Zwischen- oder Endprodukten verarbeitet werden.

Diese Bogen werden dann im Schuppenstrom der Maschine zugeführt, welche die Bogen vor dem ersten Druckwerk ausrichtet, greift und auf Maschinengeschwindigkeit beschleunigt. Die folgenden Prozesse entsprechen denen in einer herkömmlichen Bogendruckmaschine. Durch die Kombination von verschiedenen Substrattransportverfahren ist es möglich, Vorteile von zwei verschiedenen Substrattransportverfahren zu nutzen. Zum einen können günstigere Rollensubstrate eingesetzt werden, welches inline zu Bogen vereinzelt wird. Zum anderen kann die Genauigkeit des Bogentransports genutzt werden. Dadurch wird der Prozess des Anlagestapelwechsels deutlich vereinfacht, ohne auf die Genauigkeit des Bogentransports verzichten zu müssen. Druckereien können auch weiterhin die Post-Press-Maschinen für Bogensubstrate einsetzen. Die Investitionen müssen in einer Wirtschaftlichkeitsberechnung den eingesparten Substrat- und Prozesskosten entgegengestellt werden. Allgemein lässt sich ableiten, dass es durch die Kombination von zwei Substrattransportvarianten möglich ist, die Produktionssysteme für bestimmte Einsatzzwecke anzupassen.

4.3.3. Kriterien zur Bewertung von Substrattransportmethoden

Für den Aufbau einer Produktion von druckbarer Elektronik ist es notwendig, für ein vorgegebenes Substrat und Produkt eine passende Transporttechnologie auszuwählen. Ziel dabei ist es, die technischen Anforderungen bestmöglich und kostengünstig zu erfüllen. Da bei dieser Optimierung der Fertigung viele Kriterien berücksichtigt werden, müssen Kompromisse eingegangen werden. In ihrem „law of trade-offs“ berichten Schmenner und Swink, dass kein produzierendes Unternehmen gleichzeitig branchenführend in Qualität, Flexibilität und Produktivität sein kann sowie zusätzlich die Position des Kostenführers verteidigen kann.⁵¹⁶ Auf Grund der hohen Komplexität der Technologien und der Produktion lassen sich die Substrattransporttechnologien nicht einfach an Hand weniger Kennzahlen vergleichen. Wie bereits Willmann, Stocker und Dörsam dargelegt haben, bedarf die Auswahl eines geeigneten Transportverfahrens eine intensive Analyse des Produkts und des individuell eingesetzten Produktionsprozesses.⁵¹⁷

Die notwendigen Bewertungskriterien, die als Hilfe für den Entscheidungsprozess angesehen werden können, lassen sich von den Entscheidungsprozessen

⁵¹⁶ vgl. Schmenner/Swink (1998).

⁵¹⁷ vgl. Willmann/Stocker/Dörsam (2013).

anderer Branchen ableiten. So kommen bei der Auswahl von Werkzeugmaschinen folgende Oberkriterien zum Einsatz: Flexibilität, Qualität, Zuverlässigkeit, Produktivität sowie Betrieb und Instandhaltung.⁵¹⁸

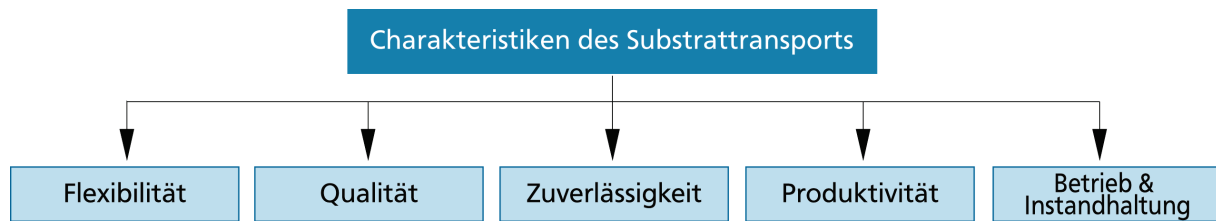


Abb. 4.16: Oberkriterien zur Auswahl einer Substrattransportmethode

Diese sehr allgemein gehaltenen Oberkriterien werden in den folgenden Abschnitten auf die druckbare Elektronik adaptiert. Die Darstellung der Auswahlkriterien basiert auf den detaillierten Beschreibungen von Willmann u.a.⁵¹⁹

4.3.3.1. Flexibilität

Flexibilität in der Fertigung ist ein Maß von Vielseitigkeit, welche die Optionen in einer Produktion erweitern.⁵²⁰ Zu Beginn der industriellen Fertigung war Flexibilität noch nicht wichtig, da dort in erster Linie die Massenproduktion etabliert wurde um Skaleneffekte auszunutzen. Erst später brachte die wachsende Produktvielfalt die Massenfertigung an ihre Grenzen, so dass die Produktion zunehmend mehr auf Flexibilität ausgelegt werden musste. Schwankende Nachfragen und immer kürzere Lieferzeiten haben die Notwendigkeit von flexibler Produktion erhöht. In den 1980iger Jahren wurde das Thema Flexibilität in der Industrie und in der Forschung immer wichtiger.⁵²¹

Nach Sethi und Sethi gibt es drei Arten von Flexibilitätsformen: Basis-Flexibilität, System-Flexibilität und aggregierte Flexibilität.⁵²² Gupta wiederum geht in seiner Einteilung näher auf produzierende Unternehmen ein und definiert die vier Ebenen „Maschinenflexibilität“, „Zellenflexibilität“, „Fabrikflexibilität“ sowie „Unternehmensflexibilität“. Die erste Ebene beschreibt die „Gesamtsumme aller Fähigkeiten einer Maschine, eine Auswahl unterschiedlicher Produkte ef-

⁵¹⁸ vgl. Tsai u. a. (2010).

⁵¹⁹ vgl. Willmann/Stocker/Dörsam (2013).

⁵²⁰ vgl. Baykasoğlu (2009).

⁵²¹ vgl. Duguay/Landry/Pasin (1997).

⁵²² vgl. Sethi/Sethi (1990).

fektiv zu verarbeiten.“⁵²³ Die zweite Ebene der „Zellenflexibilität“ umfasst neben dem Zusammenschluss mehrerer Maschinen auch die Arbeiter, Transportsysteme und die Steuerungssoftware. Die dritte Ebene beschreibt die Flexibilität einer ganzen Fabrik, die hier einen Zusammenschluss mehrerer Zellen darstellt, die durch ein zentral gesteuertes Materialfördersystem verbunden sind. Diese Flexibilität kann durch unterschiedliche Zellkonfigurationen erreicht werden. Die vierte Ebene beschreibt die „Unternehmensflexibilität“ als Handlungsfähigkeit auf höchster Ebene. Die Flexibilität ist erreicht, wenn einem Endkunden auch durch vergleichsweise unflexible Maschinen eine große Variantenvielfalt angeboten werden kann.⁵²⁴

Diese Art von Flexibilität kann ein Vorteil für die druckbare Elektronik sein, da gerade kleine Auflagengrößen durch niedrige Rüst- und Werkzeugkosten kostengünstig umsetzbar scheinen.⁵²⁵ Diese sind aber nur mit einer hohen Flexibilität in der Fertigung zu erreichen. Der Aspekt ist sicherlich nicht für alle Applikationen der druckbaren Elektronik gleich relevant. Gerade OPV und OLED könnten von einer Massenproduktion von immer gleichen Halbzeugen profitieren. Vorteile einer flexiblen Anlagentechnik und somit kleineren Auflagen gibt es insbesondere für integrierte Produkte.⁵²⁶ Kleinere Auflagen bedingen häufigere Jobwechsel und somit mehr Rüstvorgänge. Kürzere Rüstzeiten erhöhen die Maschinenverfügbarkeit und wirken sich positiv auf die Produktflexibilität und Mengenflexibilität aus.⁵²⁷ Hinzu kommt, dass die Leistungsfähigkeit von aktuellen Produkten unter Umgebungsbedingung mit Luft und Feuchtigkeit schnell nachlässt. Die dadurch notwendigen kurzen Lagerzeiten bedingen ein höheres Maß an Flexibilität. Das Zusammenführen aller Einzelprozesse in eine Inline-Produktionsanlage ist ein langfristiges Ziel der gedruckten Elektronik. Eine solche Anlage würde sich positiv auf die Produktivität aber negativ auf die Flexibilität auswirken. Die Notwendigkeit der Erweiterbarkeit hängt in erster Linie von dem Produkt ab. So sind Applikationen für Licht oder zur Energiegewinnung eher langlebiger als Produkte wie Displays oder Schaltungen. Die Erweiterbarkeit einer solchen Anlage wird auch von der Substrattransportmetho-

⁵²³ Gupta (1993). Im englischen Original: the sum total of a machine's ability to process a variety of different parts effectively.

⁵²⁴ Ein Beispiel hierfür ist die Automobilindustrie, in der die Flexibilität nicht auf dem Maschinenniveau erreicht wird, sondern sich zu großen Teilen aus der Produktionssteuerung ergibt.

⁵²⁵ vgl. Sheats (2011).

⁵²⁶ vgl. Willmann/Stocker/Dörsam (2013).

⁵²⁷ vgl. Olhager (1993).

de abhängen.⁵²⁸ In der Forschung über druckbare Elektronik kommen viele verschiedene Fertigungsverfahren zum Einsatz. Aus heutiger Sicht ist es nur schwer abzuschätzen, in welche Richtung sich die Forschung entwickeln wird. Um mit einer Produktionsanlage auch zukünftig wettbewerbsfähig zu sein, sollten die Produktionsanlage und somit auch die Substrattransportmethode mit vielen Fertigungsverfahren kompatibel sein. Gleiches gilt auch für das Substrat. Aus heutiger Sicht kann nicht abgeschätzt werden, welche Substrate in Zukunft zum Einsatz kommen sollten. So ist es von Vorteil, wenn die Substrattransportmethode zu vielen Substratarten kompatibel ist.

Die Übertragung der Flexibilität auf die Produktion von druckbarer Elektronik wurde erstmals in einer vom Autor betreuten Studienarbeit beschrieben.⁵²⁹ Für Stocker sind die folgenden fünf Kriterien zur Auswahl einer Substrattransporttechnologie bezüglich der Flexibilität von Bedeutung: Anzahl möglicher Druckverfahren, die Höhe der Auflage, die Länge der Rüstzeiten, die Erweiterbarkeit der Maschine sowie die Variabilität bezüglich des zu bedruckenden Substrats.

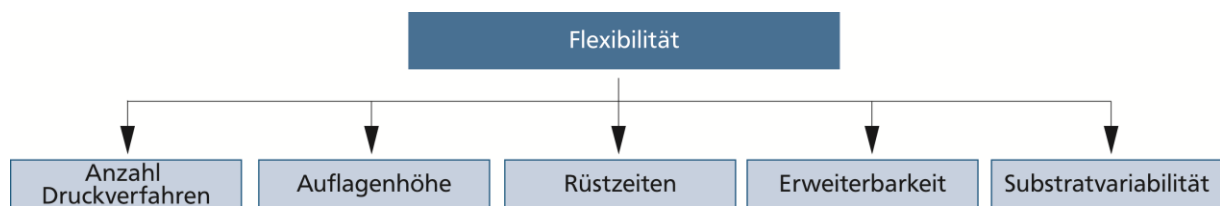


Abb. 4.17: Attribute der Flexibilität zur Auswahl einer Substrattransportmethode

Mit **Anzahl der Druckverfahren** ist nicht die maximale Anzahl der Druckverfahren gemeint, sondern die Möglichkeit, auf kein Verfahren verzichten zu müssen. Da heute noch viele Fertigungstechnologien in den Labors getestet werden, sollte der Substrattransport möglichst flexibel bezüglich dieser Fertigungstechnologien sein, um so auf verschiedene Situationen reagieren zu können. Die Produktionsanlagen sollten so flexibel sein, dass auch in Zukunft mit wenig Aufwand andere Fertigungsverfahren eingesetzt werden können.

Die Mindest-**Auflagenhöhe** von heutiger siliziumbasierter Elektronik liegt bei ca. 5.000 bis 20.000 Einheiten, da dort die Werkzeugkosten und Rüstkosten

⁵²⁸ vgl. Willmann/Stocker/Dörsam (2013).

⁵²⁹ vgl. Stocker (2012).

sehr hoch sind.⁵³⁰ Im Grafischen Drucken wiederum liegen die Auflagenhöhen von Einzelanfertigung bis zu hunderttausenden Exemplaren. Diese Flexibilität könnte so zu einem Wettbewerbsvorteil für die druckbare Elektronik werden, da so schnell auf Nachfrageänderungen und Auftragseingänge reagiert werden kann. „Die Auflagenhöhe bezeichnet somit die Mindestbestellmenge für Druck-erzeugnisse, die im Rollen- bzw. Bogendruck hergestellt werden.“⁵³¹

Die **Rüstzeiten** stehen zwar im Zusammenhang mit der Auflagenhöhe, sollten aber extra betrachtet werden, da die Länge eines einzelnen Rüstvorgangs nicht von der Auflagenhöhe abhängt.

Die **Erweiterbarkeit der Anlage** hat einen großen Einfluss auf die Flexibilität einer Anlage. Der Substrattransport sollte es ermöglichen eine Anlage zum Beispiel mit weiteren Fertigungstechnologien oder Trocknungsaggregaten auszustatten. Somit kann auf veränderte Produkte oder neue Erkenntnisse bezüglich der Fertigung reagiert werden.

Substrate müssen in der druckbaren Elektronik vielfältige Aufgaben übernehmen (vgl. Kapitel 4.1). Mit **Substratvariabilität** ist die Flexibilität der Transportmethode gemeint, unterschiedliche Substrate zu transportieren. Diese können sich unter anderem in Material, Größe und Dicke unterscheiden.⁵³²

4.3.3.2. Qualität

Das Ziel hinreichender Qualität ist für jeden Fertigungsprozess obligatorisch, da hier durch geringe Ausfallraten der Produkte Vertrauen beim Kunden gewonnen werden kann. Deshalb ist Qualitätsmanagement in der Industrie und in der Forschung seit vielen Jahrhunderten fest etabliert. Die Qualität entwickelte sich vom Kostentreiber hin zum Wettbewerbsvorteil. Auch in der graphischen Industrie spielt Qualität eine große Rolle, da diese direkt mit dem Auge überprüft werden kann. Diese Art von Qualitätskontrolle ist allerdings für die druckbare Elektronik nicht geeignet, da diese zum einen deutlich höhere Genauigkeiten und zum anderen noch weitere Qualitätskriterien erfordert.

⁵³⁰ vgl. Sheats (2011).

⁵³¹ Stocker (2012).

⁵³² vgl. Stocker (2012).

Neben kleineren Strukturauflösungen ist vor allem die Dicke und Homogenität der Schichten sehr wichtig. Als Attribute aus dem Bereich der Qualität beschreibt Stocker die Makulatur, die Präzision, die Homogenität der Schichten sowie die Prozess-überwachung.⁵³³ Diese Einflussfaktoren sind als Hierarchie in Abb. 4.18 dargestellt.

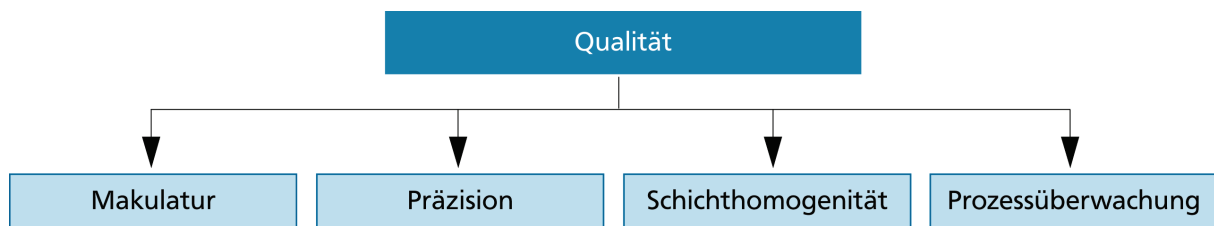


Abb. 4.18: Attribute der Qualität zur Auswahl einer Substrattransportmethode

Makulatur beschreibt im Druckprozess den Ausschuss als die bedruckten Substrate, welche die Qualitätskriterien nicht einhalten, und deshalb nicht verkauft werden können. Diese Substrate müssen entsorgt werden. Die Makulatur fällt vor allem während des Anfahrens eines Prozesses an, bis der Prozess im Gleichgewicht ist und alle wichtigen Stellgrößen eingestellt wurden.

Präzision beschreibt beim funktionalen Drucken vornehmlich die Strukturauflösung und das Register. Dabei hängt vor allem das Register sehr stark von dem Substrattransport ab. Die Begriffe Register und Strukturauflösung werden in Kapitel 2.2.2 erklärt. Beide Größen werden von dem Substrattransport beeinflusst. In einer vom Autor betreuten Bachelorarbeit wurden die Einflussfaktoren des Substrattransports auf das Register untersucht. Schüttler konnte für Rollen- als auch für Bogendruck jeweils etwa 35 Einflussfaktoren identifizieren.⁵³⁴

Die **Schichthomogenität** spielt in der druckbaren Elektronik eine entscheidende Rolle für die Qualität der Devices.⁵³⁵ Obwohl die Schichtdicke und Schichthomogenität auf Mechanismen innerhalb des Druckwerks basieren, gibt es auch Eigenschaften des Substrattransports, die sich auf die Schichthomogenität auswirken. Aus diesem Grund wird dieses Kriterium mit berücksichtigt.

⁵³³ vgl. Stocker (2012).

⁵³⁴ vgl. Schüttler (2011).

⁵³⁵ vgl. Kapitel 2.2.2

Das Ziel der Produktion von druckbarer Elektronik ist eine konstant hohe Fertigungsqualität. Um diese zu erreichen ist eine schnelle **Prozessüberwachung** notwendig, damit Fehler erkannt werden, bevor fortlaufend Ausschuss produziert wird. Betrachtet werden somit die Unterschiede zwischen den Substrattransportmethoden bezüglich der Integrierbarkeit von Kontrolleinheiten, damit der produzierte Ausschuss in der jeweiligen Fertigungslinie minimiert werden kann.

4.3.3.3. Zuverlässigkeit

Mit Zuverlässigkeit wird häufig die Produktzuverlässigkeit beschrieben, welche zum Beispiel etwas über die Lebensdauer des Produktes aussagt. Diese Art der Zuverlässigkeit ist zwar für den Erfolg druckbarer Elektronik von entscheidender Bedeutung, spielt aber für die Auswahl des Substrattransports keine Rolle. Es wird unterstellt, dass die Auswahl der Substrattransportmethode keine direkte Auswirkung auf die Lebensdauer eines elektronischen Elements hat. Darauf haben vor allem die Funktionsfluide sowie das Substrat Einfluss. Zuverlässigkeit wird daher als „Fähigkeit eines Fertigungsprozesses, Erzeugnisse konstanter und vorhersagbarer Qualität zu produzieren“ definiert.⁵³⁶

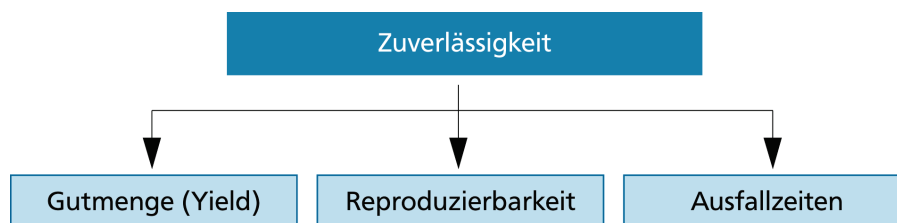


Abb. 4.19: Attribute der Zuverlässigkeit zur Auswahl einer Substrattransportmethode

Die **Gutmenge** (Yield) ist das Verhältnis von tatsächlich funktionsfähigen Elementen zu der Anzahl Elemente, die im gleichen Zeitraum potentiell funktionsfähig herstellbar wären.⁵³⁷ Damit beschreibt die Gutmenge die Auslastung einer Produktionslinie sowie die Zuverlässigkeit der Prozessqualität.⁵³⁸ In dieser Untersuchung ist der Einfluss des Substrattransports auf die Gutmenge von Interesse.

⁵³⁶ Stocker (2012).

⁵³⁷ vgl. Lee/Johnson (2011).

⁵³⁸ Für weitere Details vgl. Stocker (2012).

Die **Reproduzierbarkeit** beschreibt die Möglichkeit einer Produktionsanlage, Devices mit immer gleichen Eigenschaften herstellen zu können. Somit sagt die Reproduzierbarkeit etwas über die Berechenbarkeit der elektronischen Eigenschaften der produzierten Bauteile aus. Hierbei stellt sich die Frage, welchen Einfluss der Substrattransport auf die Reproduzierbarkeit hat.

Um ökonomisch produzieren zu können, muss die technische Verfügbarkeit der eingesetzten Maschinen hoch sein, und somit die **Ausfallzeiten** minimiert werden. Ausfälle können beispielsweise durch Defekte, Wartungsintervalle, Justiervorgänge und das Nachfüllen des Substratspeichers zu Stande kommen. Ausfallzeiten entstehen also nicht nur durch den Wechsel zwischen verschiedenen Druckaufträgen, sondern auch durch andere Einflüsse des Produktionsablaufs.

4.3.3.4. Produktivität

Die Produktivität wird generell als Output pro Zeit beschrieben. Für Druckmaschinen kann dies als produzierte Fläche pro Zeit definiert werden. Darauf haben die technischen Parameter **Druckgeschwindigkeit** und **Breite des Substrats** einen Einfluss. Für druckbare Elektronik ist jedoch nicht die bedruckte Fläche entscheidend, sondern die Anzahl Elemente, die auf dieser Fläche enthalten sind. Somit ist für die Produktivität noch die Integrationsdichte von Bedeutung. Als einfache Näherung eignet sich die hergestellte Fläche pro Zeit sehr gut.

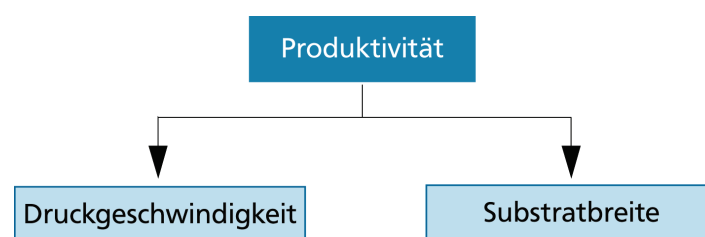


Abb. 4.20: Attribute der Produktivität zur Auswahl einer Substrattransportmethode

4.3.3.5. Betrieb und Instandhaltung

Neben den oben beschriebenen messbaren Einflussfaktoren wie zum Beispiel die Produktivität, existieren auch Einflüsse, die nicht immer objektiv beurteilt werden können. Diese Einflüsse werden unter dem Kriterium „Betrieb und Instandhaltung“ zusammengefasst.

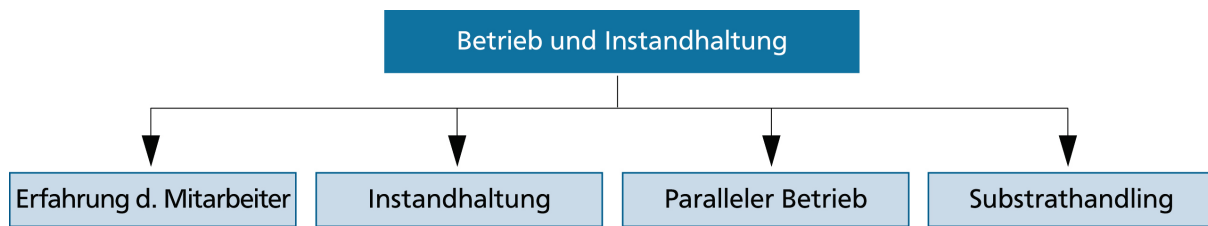


Abb. 4.21: Attribute von Betrieb und Instandhaltung zur Auswahl einer Substrattransportmethode

Die Bedienung von Druckanlagen hat sich in den letzten Jahrzehnten grundsätzlich verändert. Früher waren die Ergebnisse maßgeblich von dem individuellen Können und der **Erfahrung der Mitarbeiter** abhängig.⁵³⁹ Heute ermöglicht die steigende Automatisierung höhere Produktionsgeschwindigkeiten sowie konstante Druckqualität. Die Anforderungen an den Maschinenbediener haben sich deutlich gewandelt. Bei der Produktion von druckbarer Elektronik werden viele Kenntnisse über die neuen Funktionsfluide und die Prozesse notwendig sein. Hier stellt sich die Frage, ob die Substrattransportmethode einen Einfluss auf das benötigte Wissen der Mitarbeiter hat.

Der **parallele Betrieb** von Produktionsanlagen hat den Vorteil, dass langsame Prozessschritte nicht automatisch zu längeren Bearbeitungszeiten führen und der Fertigungsprozess als Ganzes weniger anfällig für Ausfälle wird. Nachteilig sind die zunehmend komplexer werdende Steuerung der Fertigung und die höheren Investitionskosten.⁵⁴⁰ Für die Fertigung von druckbarer Elektronik ist dieses Attribut wichtig, da beispielsweise lange Trocknungszeiten und Unterschiede in der Druckgeschwindigkeit einzelner Schichten große Herausforderungen für eine Inline-Fertigung darstellen. Daher wäre eine Parallelisierung einzelner Produktionsschritte auf mehrere Maschinen vorteilhaft und könnte zu höherer Produktivität führen. Hier gilt es das Potential der Substrattransportmethode für eine Parallelisierung zu untersuchen.

In einer kompletten Inline-Fertigung⁵⁴¹ reduziert sich das **Substrathandling** auf das Bewegen der Rohmaterialien und der Endprodukte. Kommen mehrere einzelne Produktionsanlagen zum Einsatz, müssen auch Zwischenprodukte zwischen Maschinen transportiert werden.⁵⁴²

⁵³⁹ vgl. Gamota/Zhang (2007).

⁵⁴⁰ vgl. Liu u. a. (2012).

⁵⁴¹ vgl. Kapitel 4.1

⁵⁴² vgl. Kapitel 4.4.4

Die **Einfachheit von Reparaturen** beschreibt die mechanischen Gegebenheiten der Produktionsanlage und nicht das Können der Mitarbeiter. Hier gilt es zu untersuchen, ob es Unterschiede für die einzelnen Substrattransportmethoden gibt, da für die Profitabilität einer Maschine ihre Kapazitätsauslastung und die davon direkt abhängige Verfügbarkeit entscheidend ist.⁵⁴³ Für niedrige Stückpreise müssen Reparaturarbeiten somit schnell und zuverlässig erledigt werden können.

Abb. 4.22 gibt einen Überblick über die in diesem Abschnitt beschriebenen 19 Charakteristiken des Substrattransports.

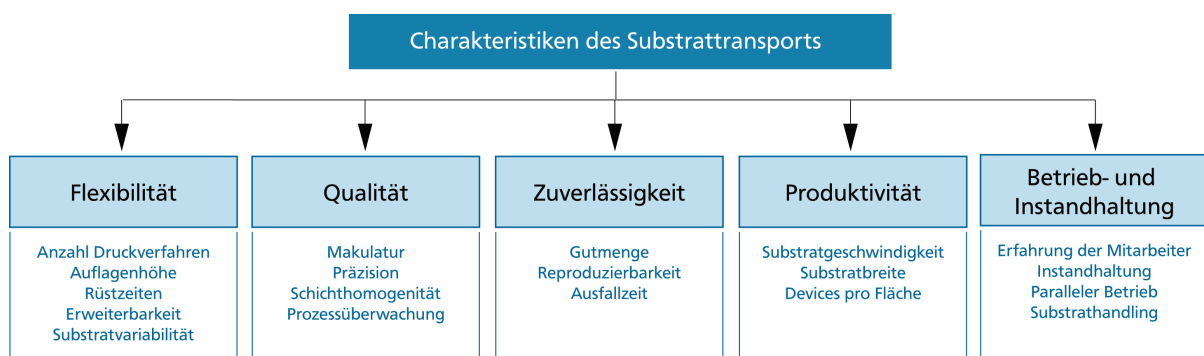


Abb. 4.22: Darstellung aller Kriterien zur Auswahl einer Substrattransportmethode
Quelle: In Anlehnung an Stocker (2012)

Das Ziel dieses Abschnitts war die Untersuchung des Einflusses der Substrattransportmethode auf die Produktion. Hierfür wurden zunächst die Anforderungen der druckbaren Elektronik an den Substrattransport beschrieben. Daraufhin wurden erstmals vier mögliche Substrattransportmethoden identifiziert und im Detail beschrieben. Danach wurde eine Hierarchie mit 19 Charakteristiken des Substrattransports und fünf Oberkriterien erstellt, welche sich an der Maschinenselektion im klassischen Maschinenbau orientiert. Anhand dieser Hierarchie, die in Abb. 4.22 dargestellt ist, kann ein Auswahlprozess bezüglich einer Substrattransportmethode durchgeführt werden. Für die jeweilige Situation gilt es, die Attribute zu gewichten.

⁵⁴³ vgl. Kipphan (2001).

4.4. Anordnung der Bearbeitungsstationen zu einem optimalen Produktionssystem

Nachdem in den Kapiteln zuvor bereits die Auswahl der Fertigungsverfahren sowie die Auswahl der Substrattransportmethode erörtert wurden, stellt sich nun die Frage nach der optimalen Anordnung der einzelnen Bearbeitungsstationen. In dem Forschungsfeld der Produktionssystemplanung wird der Frage nachgegangen, wie die einzelnen Produktiveinheiten zu einem Produktionssystem angeordnet werden sollen. Das Ziel der Produktionssystemplanung ist, die Bearbeitungsstationen optimal anzuordnen, damit die Wertschöpfung im Unternehmen maximiert werden kann. Dabei wird die Produktion nach den Kriterien Flexibilität, Qualität, Geschwindigkeit und Wirtschaftlichkeit optimiert.⁵⁴⁴

Die aus der Literatur⁵⁴⁵ bekannten standardisierten Anordnungen nach Fertigungsprinzipien lassen sich nicht einfach auf die druckbare Elektronik übertragen. Bis auf wenige Ausnahmen ist die Reihenfolge der Bearbeitungsstationen durch das Layout des Devices vorgegeben. Da die Schichten in einer bestimmten Reihenfolge, dem Layout folgend, übereinander gestapelt werden, müssen diese zwingend nacheinander aufgebracht werden. Wie für den OPV-Prozess dargestellt, müssen auch die Vorbereitungsschritte wie Reinigen des Substrats oder Nachbehandlungsschritte wie Sintern oder Trocknen des Films in einem festgelegten Ablauf erfolgen.⁵⁴⁶

Diese fest vorgegebene Reihenfolge in einem Produktionssystem stellen Ausnahmen der bekannten Fertigungsprinzipien dar und werden Zwangslauffertigung genannt. Die Zwangslauffertigung ist nur möglich, wenn nur ein Produkt, evtl. mit Sortendifferenzierung, gefertigt wird. Beispiele sind Produkte der chemische Industrie, der Papierfertigung oder einer Brauerei.⁵⁴⁷ Man spricht auch von einem prozessbedingten Zeitzwang. In Abgrenzung dazu spricht man bei einer Fertigung mit organisatorisch bedingtem Zeitzwang von einem Produktionssystem der getakteten Fließlinienfertigung oder Fließbandfertigung.⁵⁴⁸

⁵⁴⁴ vgl. Kapitel 2.3.1.

⁵⁴⁵ vgl. Kapitel 2.3.1.

⁵⁴⁶ vgl. Kapitel 3.1

⁵⁴⁷ Preuß (1970).

⁵⁴⁸ Reidel (2006).

Um die optimale Anordnung im Sinne der vier Zieldimensionen der Produktion⁵⁴⁹ zu erlangen, stellen sich für die Produktion von druckbarer Elektronik folgende Fragen:

1) Erste Zieldimensionen der Produktion – **Variabilität:**

- a) Wie muss die Produktionsanlage beschaffen sein, dass mit dieser Produktionsanlage auch andere Varianten oder Devices hergestellt werden können?
- b) Wie muss das Substrathandling außerhalb der Produktionsanlage gestaltet werden, dass die Variabilität der Produktion nicht beeinträchtigt wird?

2) Zweite Zieldimensionen der Produktion – **Qualität:**

- a) Wie muss die Produktionsanlage beschaffen sein, damit die beste Qualität der Devices produziert werden kann?
- b) Wie muss die Produktionsanlage beschaffen sein, damit der Ausschuss und die Nacharbeit minimal werden?
- c) Wie muss das Substrathandling außerhalb der Produktionsanlage gestaltet werden, dass die Qualität der Devices nicht beeinträchtigt wird?

3) Dritte Zieldimensionen der Produktion – **Geschwindigkeit:**

- a) Wie viele Fertigungsschritte sind pro Ab- und Aufrollvorgang optimal?
- b) Wann lohnt sich eine Parallelisierung?
- c) Wie muss die Produktionsanlage beschaffen sein, damit die Durchlaufzeit minimal wird?
- d) Wie muss die Produktionsanlage beschaffen sein, damit die Rüstzeit minimal wird?
- e) Wie muss die Produktionsanlage beschaffen sein, damit der Durchsatz maximal wird?
- f) Wie muss die Produktionsanlage beschaffen sein, damit die technische Verfügbarkeit maximal wird?
- g) Wann ist der optimale Zeitpunkt der Vereinzelung von Substraten in der Produktion?

⁵⁴⁹ vgl. Erlach (2010).

- h) Wie muss das Substrathandling außerhalb der Produktionsanlage gestaltet werden, dass der Durchsatz maximal wird?
- i) Wie muss das Substrathandling außerhalb der Produktionsanlage gestaltet werden, dass die Durchlaufzeit minimal wird?

4) Vierte Zieldimensionen der Produktion – **Wirtschaftlichkeit:**

- a) Wie muss die Produktionsanlage beschaffen sein, dass der Gewinn maximiert wird?
- b) Wie muss die Produktionsanlage beschaffen sein, damit die Ausnutzung der Substrate und Funktionsfluide optimiert wird?
- c) Wie muss die Produktionsanlage beschaffen sein, damit die Flächeneffizienz, Mitarbeitereffizienz und Energieeffizienz maximiert wird?

Für eine optimale Anordnung im Sinne der vier Zieldimensionen der Produktion müssen alle hier gestellten Fragen im Detail gelöst werden. Auf Grund der Menge an Fragen werden zunächst nur ausgewählte Fragen der dritten Zieldimensionen (Geschwindigkeit) im Detail untersucht. Für diese Untersuchung muss der Fertigungsprozess zuvor in ein Modell transformiert werden. Ein Modell soll die komplexe Wirklichkeit soweit vereinfachen, damit Einzelprobleme daran einfacher untersucht werden können.⁵⁵⁰ Die Simulation anhand eines vereinfachten Modells ist hilfreich, da somit eine Vielzahl von Prozessvarianten und das resultierende Systemverhalten simuliert werden können.⁵⁵¹ Bei der folgenden Betrachtung liegt der Schwerpunkt auf einer prozesstechnisch optimalen Fertigung. Die für das Modell notwendigen Vereinfachungen sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.3: Vereinfachung für das Modell zur Optimierung des Fertigungsprozesses
Quelle: In Anlehnung an Uellner (2012).

Zur Vereinfachung werden folgende Annahmen getroffen:

- 1) Alle Produktionsfaktoren sind jederzeit unbegrenzt zu konstanten Kosten erhältlich.
- 2) Alle gefertigten Devices sind sofort zu konstanten Preisen und in jeder Menge absetzbar.
- 3) Spezielle Eigenschaften der Produktionsanlage oder Eigenschaften der

⁵⁵⁰ vgl. VDI Verlag (1996b).

⁵⁵¹ vgl. Pawellek (2008a).

einzelnen Fertigungs-verfahren werden nicht berücksichtigt. Dazu zählen unter anderem: Anschaffungskosten, Materialverbrauch, Energieverbrauch, Wartungszeiten und Ausfallzeiten.

- 4) Es kommen in diesem Fall nur Rollensubstrate zum Einsatz.
- 5) Die Prozessschritte sind in ihrer Reihenfolge nicht variabel.
- 6) Für das Produktionssystem gibt es zunächst keine Budgetrestriktion.
- 7) Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Transportzeiten Teil der Rüstzeiten sind.
- 8) Es wird zu festen Zeitabständen von t_{\max} eine neue Substratrolle in die Maschine eingeführt.
- 9) Jeder Prozessschritt kann bei ausreichender Qualität mit der vorgesehenen Geschwindigkeit oder langsamer durchgeführt werden.

Abb. 4.23 zeigt eine symbolische Darstellung des Modells mit den wichtigsten Variablen. In dieser Darstellung steht jedes Kästchen für einen Prozessschritt, wobei n die Anzahl der Prozessschritte und m die Anzahl der parallelen eingesetzten Maschinen an einer Bearbeitungsstation ist. Die Rüstzeiten sind mit $t_{R(n)}$ über den Pfeilen dargestellt und die Bearbeitungszeiten sind mit $t_{B(n)}$ innerhalb der Kästchen dargestellt.⁵⁵²

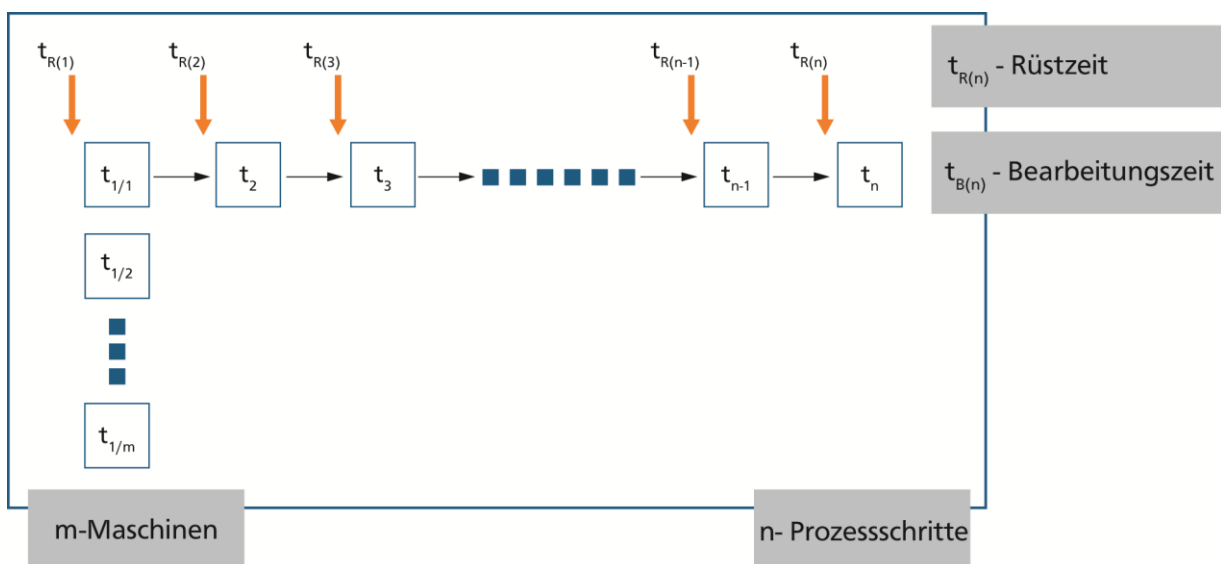


Abb. 4.23: Symbolische Darstellung des abstrahierten Fertigungsprozesses

⁵⁵² Wird ein Bearbeitungsschritt mit mehreren Maschinen parallel betrieben, stellt $t_{B(n)}$ die Bearbeitungszeit dividiert durch die Anzahl der eingesetzten Maschinen dar.

Um das Modell übersichtlich zu halten, wurde ein Produktionsprozess mit sieben Einzelprozessen betrachtet werden. Diese sieben Prozessschritte entsprechen einem OPV-Herstellprozess mit sehr einfachem Layout.⁵⁵³ Der vereinfachte Prozess ist in Abb. 4.24 dargestellt. Die Prozesszeiten sind frei geschätzt. In dieser Darstellung wird nicht zwischen unterschiedlichen Prozessen wie Trocknung oder Drucken unterschieden, da dies für die weitere Betrachtung nicht relevant ist. So entspricht jedes Kästchen in Abb. 4.24 einem Prozessschritt, der unter den Kästchen symbolisch dargestellt ist.

Die Bearbeitungszeit in einem Druckwerk kann in der Zeit ausgedrückt werden, die das Substrat minimal braucht, um das Druckwerk zu passieren. Das Druckwerk wird in diesem Fall mit einer Länge von einem Meter angenommen.⁵⁵⁴ Abhängig von der maximal möglichen Geschwindigkeit ergibt sich somit die minimale Bearbeitungszeit. So ergibt sich beispielsweise für das Siebdruckverfahren als Rollensiebdruck bei einer maximalen Geschwindigkeit von 1 m/s eine Bearbeitungszeit von 1 s. Bei einer 10 m langen Trockeneinheit ergibt sich bei der gleichen Geschwindigkeit eine Bearbeitungszeit von 10 s.

Die Rüstzeit wird in einen fixen und einen variablen Anteil angegeben. Der fixe Anteil beschreibt die Zeit, die notwendig ist, um einen Rollenwechsel an einer Ab- und Aufrolleinheit durchzuführen. Bei standardisierten Prozessen, wie bei einer Fertigung von OPV angenommen, besteht der Rollenwechsel aus Stoppen der Maschine, Einbringen der neuen Substratrolle, Ankleben der neuen Substratbahn, Entfernen der alten Substratbahn sowie das Beschleunigen der Substratbahn. Der variable Anteil der Rüstzeit beschreibt die Zeit, die notwendig ist, ein Druckwerk zu rüsten. Allerdings muss ein Druckwerk nicht nach jeder gedruckten Rolle gerüstet werden.

⁵⁵³ vgl. Kapitel 3.1

⁵⁵⁴ Erfahrung mit der Druckmaschine Gallus RCS 330-HD des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren zeigen, dass 1 m eine realistische Angabe ist.

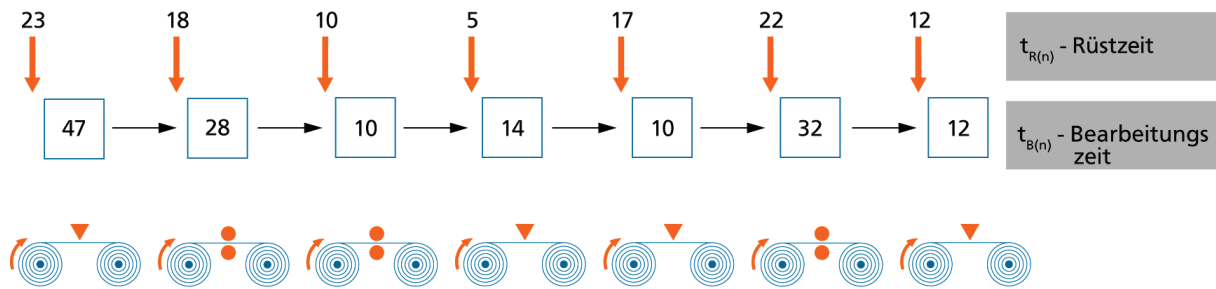


Abb. 4.24: Abstraktion eines Produktionsprozess in eine vereinfachte Darstellung.

Alle Variablen, die im Laufe dieses Kapitels verwendet werden, sind in Tabelle 4.4 mit ihren Formelzeichen aufgelistet und kurz erläutert.

Tabelle 4.4: Auflistung der Variablen, die bei der Berechnung in diesem Kapitel verwendet werden.
Quelle: In Anlehnung an Uellner (2012).

n	Anzahl der Fertigungsschritte
i	Index für aktuellen Prozessschritt
m	Anzahl der Maschinen an einer Bearbeitungsstation
q	Anzahl der in den Fertigungsprozess eingeführten Substratrollen
a	Anzahl der Abrollvorgänge
$t_{B(i)}$	Bearbeitungszeit des Prozessschritts i
$t_{R(i)}$	Rüstzeit des Prozessschritts i
$t_{Rf(i)}$	fixe Rüstzeit des Prozessschritts i
$t_{Rv(i)}$	variable Rüstzeit des Prozessschritts i
$t_{L(i)}$	Leerzeit des Prozessschritts i
$t_{Li(i)}$	Leerzeit im Abrollvorgang des Prozessschritts i
$t_{Lz(i)}$	Leerzeit zwischen zwei Abrollvorgängen
$t_{(i)}$	Summe aus Rüst- und Bearbeitungszeit des Prozessschritts i
t_{\max}	Zeit des langsamsten Bearbeitungsschritts des Fertigungsprozesses
$t_{(i)}$	Zeit des schnellsten Bearbeitungsschritts des Fertigungsprozesses
$t_{\min (i)}$	Durchlaufzeit
	Durchsatz (in Output pro Zeit)
DLZ	zeitlicher Durchsatz (Zeit, die eine bestimmte Output-Menge zur Produktion benötigt)
D	minimaler zeitlicher Durchsatz
D_z	minimaler zeitlicher Durchsatz
$D_{z \min}$	Maschinenanzahl des Prozessschritts i, mit der der Durchsatz zu t_{\min} realisiert werden kann
$f_{(i)}$	
ZE	Zeiteinheiten

4.4.1. Optimierung des Produktionssystems nach der Zeit

Die Lösungen in diesem Kapitel wurden in einer vom Autor betreuten Bachelorarbeit von Uellner erarbeitet.⁵⁵⁵ Die Ergebnisse basieren auf dem von Uellner entwickelten Algorithmus. Bei der zeitlichen Optimierung einer Fertigung geht es darum die Bearbeitungszeit und die Prozesszeiten zu optimieren, mit dem Ziel, die Durchlaufzeit DLZ eines Produkts durch das Produktionssystem zu minimieren. Um die Durchlaufzeit DLZ zu bestimmen, werden die Bearbeitungszeiten und die Rüstzeiten aller Fertigungsschritte aufsummiert.⁵⁵⁶

$$DLZ = \sum_{i=1}^n t_{B(i)} + \sum_{i=1}^n t_{R(i)} \quad \text{Formel 4.2}$$

Die Durchlaufzeit DLZ für die q-te Substratrolle in dem Prozess berechnet sich wie folgt:

$$DLZ_q = \begin{cases} DLZ & ; \text{für } t_{max} = t_1 \\ (q-1)(t_{max} - t_1) + DLZ & ; \text{für } t_{max} \neq t_1 \end{cases} \quad \text{Formel 4.3}$$

Dabei entspricht der Ausdruck $(q-1)(t_{max} - t_1)$ der Liegezeit, die entsteht, da sich vor dem langsamsten Prozess die Substratrollen stauen. Diese können vermieden werden, wenn die Substratrollen nur noch in dem Zeitabstand t_{max} eingebracht werden.

Anhand der Durchlaufzeit DLZ zwei hintereinander folgenden Substratrollen lässt sich der zeitliche Durchsatz D_z des Fertigungsprozesses berechnen, welcher unmittelbar nach dem letzten Prozessschritt betrachtet wird. Die Zeit t_{max} beschreibt die Zeit des langsamsten Prozessschritts. Dieser Prozessschritt besitzt materiell den kleinsten Durchsatz und folglich zeitlich den längsten Durchsatz.⁵⁵⁷

$$D_z = DLZ_q - DLZ_{q-1} = D_{min} = D_{zmax} = t_{max} \quad \text{Formel 4.4}$$

⁵⁵⁵ vgl. Uellner (2012).

⁵⁵⁶ vgl. Günther/Tempelmeier (2012a).

⁵⁵⁷ vgl. Uellner (2012).

Aus Formel 4.3 und Formel 4.4 ergeben sich für den in Abb. 4.24 dargestellten vereinfachten Produktionsprozess folgende Durchlaufzeit DLZ und zeitlicher Durchsatz D_z :

$$\begin{aligned} DLZ &= 153 \text{ ZE} + 107 \text{ ZE} = 260 \text{ ZE} \\ D_z &= 47 \text{ ZE} + 23 \text{ ZE} = 70 \text{ ZE} \end{aligned} \quad \text{Formel 4.5}$$

Die Summe aller Bearbeitungszeiten in dem betrachteten Produktionsprozess beträgt 153 ZE, und die Summe aller Rüstzeiten beträgt 107 ZE. Die Summe aus beidem ergibt die Durchlaufzeit DLZ von 260 ZE pro Substratrolle.

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Ansätze zur Optimierung des Produktionssystems vorgestellt. Darin werden zunächst die Größen Durchsatz D_z und Durchlaufzeit DLZ optimiert. Hierfür wird zuerst die Anzahl der Maschinen pro Bearbeitungsstation erhöht, um langsame Prozessschritte zu optimieren.

Daraufhin erfolgt eine Reduzierung der Abrollvorgänge durch Zusammenfassen von Bearbeitungsstationen in einer Abrolleinheit, um die Rüstzeiten zu minimieren. Danach werden diese beiden Lösungen kombiniert und dann mit dem System mit automatischem Rollenwechsel verglichen.

4.4.1.1. Optimierung durch Parallelisieren der Bearbeitungsstationen

In diesem Abschnitt werden Bearbeitungsstationen mit geringem materiellen Durchsatz durch mehrere gleiche Systeme ergänzt, um diese Engpässe in dem Produktionssystem zu entschärfen. Ziel der Erhöhung der Maschinen an einer Bearbeitungsstation ist, den Durchsatz D des gesamten Produktionssystems zu erhöhen. Da in dem vorgestellten Modell mit dem zeitlichen Durchsatz D_z gerechnet wird, gilt es diesen zu verringern. Zunächst stellt sich die Frage, wie viele Maschinen zusätzlich eingesetzt werden sollen, um den zeitlichen Durchsatz D_z und die Durchlaufzeit DLZ zu minimieren.

Hierzu werden zunächst alle Prozesszeiten durch die minimale Prozesszeit in der Prozesskette geteilt. Der daraus entstehende Faktor $f_{(i)}$ gibt die Anzahl der Maschinen jeder Bearbeitungsstation i an, mit welchem der Durchsatz D_z zu t_{\min} realisiert werden kann (vgl. Formel 4.6 und Formel 4.7).

$$t_{min} = \min(t_{B(i)}) \quad \text{Formel 4.6}$$

$$f_{(i)} = t_{B(i)} / t_{min} \quad \text{Formel 4.7}$$

Der materielle Durchsatz D der jeweiligen Bearbeitungsstation kann nun mit der Anzahl der Maschinen multipliziert werden. Respektive der zeitliche Durchsatz D_z durch diese Anzahl geteilt werden. Somit berechnet sich der zeitliche Durchsatz D_z wie folgt:

$$D_{z(i)} = t_{(i)} / f_{(i)} \quad \text{Formel 4.8}$$

Durch Parallelisierung der langsamen Bearbeitungsstationen können die Leerzeiten $t_{L(i)}$ einzelner Bearbeitungsstationen verringert, aber nicht verhindert werden. Leerzeiten $t_{L(i)}$ berechnen sich nach der Formel 4.9.⁵⁵⁸

$$t_{L(i)} = (D_{zmin} - D_{z(i)}) \times m \times q \quad \text{Formel 4.9}$$

Die Ergebnisse der Parallelisierung sind in Abb. 4.25 dargestellt (System 1). Für die sieben Bearbeitungsstationen kommen insgesamt nun 17 anstatt sieben Maschinen zum Einsatz. Drei zusätzliche Maschinen werden an der ersten und langsamsten Bearbeitungsstationen hinzugefügt. Zwei zusätzliche Maschine an der zweiten und sechsten Bearbeitungsstationen hinzugefügt. An den Bearbeitungsstationen drei, fünf und sieben wird jeweils eine zusätzliche Maschine installiert. In dem oberen Teil der Abbildung werden alle 17 Maschinen angezeigt. In den Kästchen steht die Bearbeitungszeit für jede Maschine. Darunter wurde eine andere Darstellungsform gewählt. Rechts neben den Kästchen wird die Anzahl der parallel eingesetzten Maschinen je Bearbeitungsstation angegeben. Der Wert in den Kästchen gibt nun die aggregierte Bearbeitungszeit für alle parallel eingesetzten Maschinen pro Bearbeitungsstation an.

⁵⁵⁸ vgl. Uellner (2012).

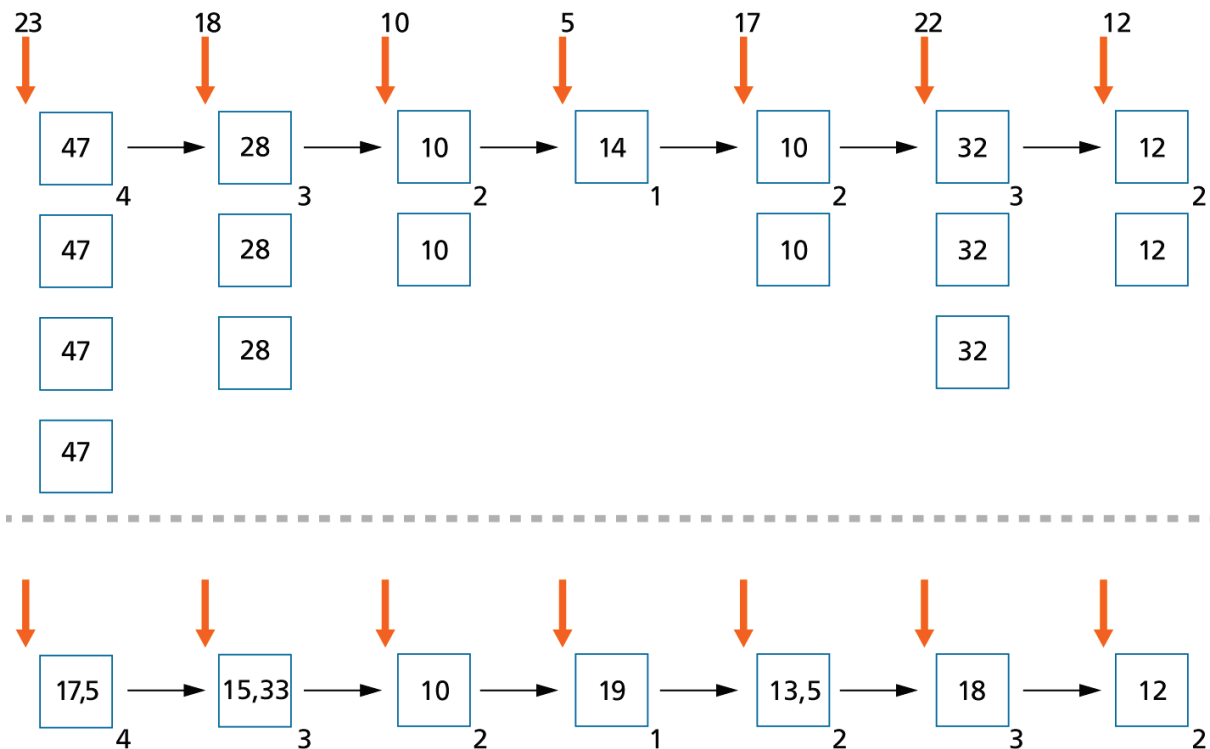


Abb. 4.25: Optimaler Prozess durch Parallelisierung der Bearbeitungsstationen. (System 1)

Werden nun neben dem Durchsatz auch die Leerzeiten betrachtet, ergeben sich andere Werte. Die Ergebnisse für den zeitlichen Durchsatz D_z und die daraus entstehenden Leerzeiten $t_{L(i)}$ für das Modell sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Diese nicht ganzzahligen Faktoren, die mit Formel 4.7 berechnet wurden, müssen nun auf ganze Zahlen gerundet werden, da nur ganze Maschinen installiert werden können.⁵⁵⁹ In der folgenden Tabelle ist in der zweiten Zeile die Maschinenanzahl m dargestellt, welche dem gerundeten Faktor f entspricht. Es werden jeweils die auf- und abgerundeten Werte nebeneinander dargestellt. Der zeitliche Durchsatz D_z und die Leerzeit t_L wurden jeweils für beide gerundeten Werte berechnet und in Tabelle 4.5 nebeneinander dargestellt. Der zeitliche Durchsatz D_z kann durch den Einsatz mehrerer Maschinen gesenkt werden.

Tabelle 4.5: Ergebnisse des zeitlichen Durchsatzes und Leerlaufzeiten durch Parallelisierung

Bearbeitungsschritt	1		2		3		4	5		6		7		Σ
Maschinenanzahl m	3	4	2	3	1	2	1	1	2	2	3	1	2	-
zeitlicher Durchsatz $D_z(t)$	23,33	17,50	23,00	15,33	20,00	10,00	19,00	27,00	13,50	27,00	18,00	24,00	12,00	-
Leerzeit t_L ($q=1$)	11	6	8	11	7	18	8	0	11	0	3	3	14	37 63
DLZ	70		46		20		19	27		54		24		260

⁵⁵⁹ vgl. Uellner (2012).

Nun stellt sich die Frage, mit welcher der beiden Kombination (auf- oder abgerundete Maschinenanzahl) es optimal ist zu produzieren. Als Optimierungsgröße wird hier die Leerzeit t_L gewählt, da diese nur (kalkulatorische) Kosten verursacht und somit so gering wie möglich ausfallen sollte.⁵⁶⁰ In diesem Beispiel ergibt die Berechnung, dass in allen Fällen die kleinere Maschinenanzahl gewählt wird. Gegenüber der Variante, welche immer die größere Anzahl der Maschinen wählt, können die Leerzeiten t_L um 26 ZE von 63 ZE auf 37 ZE reduziert werden. Der zeitliche Durchsatz D_z steigt dabei leicht von 19 ZE auf 27 ZE. Die Durchlaufzeit DLZ bleibt allerdings unverändert bei 260 ZE.⁵⁶¹ Mit diesen Ergebnissen ergibt sich das Produktionssystem wie in Abb. 4.26 dargestellt (System 1b).

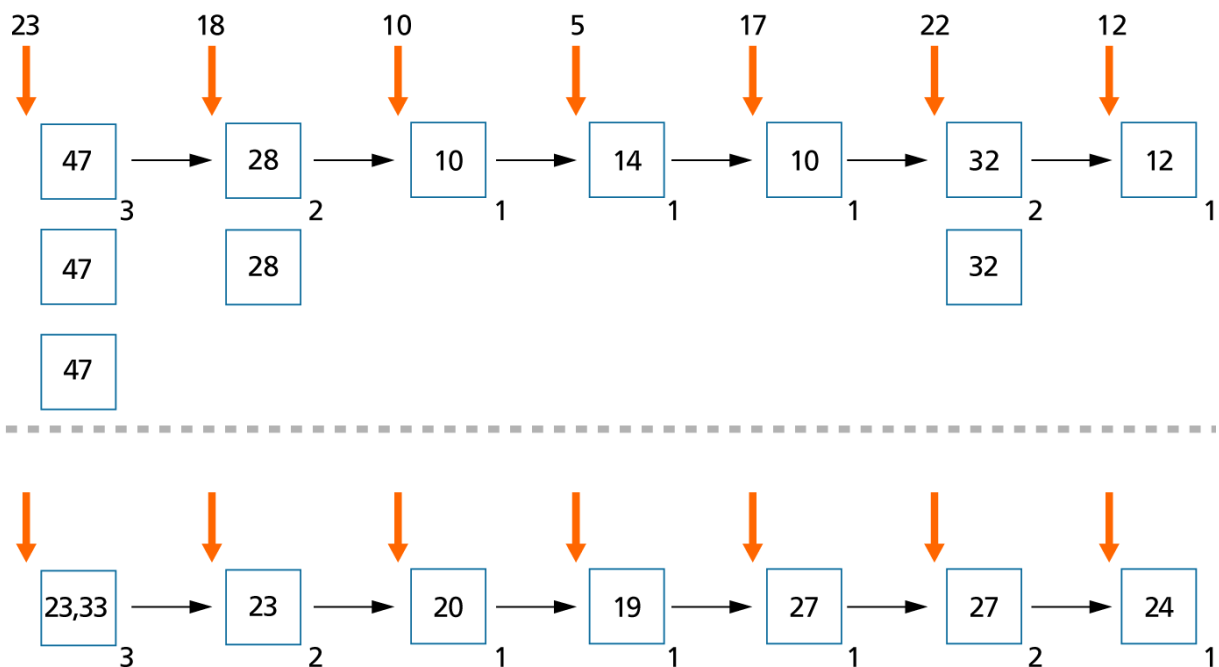


Abb. 4.26: Optimaler Prozess durch Parallelisierung d. Stationen & Reduzierung d. Leerzeiten. (System 1b)

Für die sieben Bearbeitungsstationen kommen insgesamt nun elf anstatt sieben Maschinen zum Einsatz. Zwei zusätzliche Maschinen werden an der ersten und langsamsten Bearbeitungsstationen hinzugefügt. Jeweils eine zusätzliche Maschine wird an der zweiten und sechsten Bearbeitungsstationen hinzugefügt. Erkenntnisse aus der Optimierung durch Parallelisierung sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass eine Optimierung

⁵⁶⁰ vgl. Uellner (2012).

⁵⁶¹ Die Ergebnisse wurden durch ein von Uellner (2012) entwickeltes Matlab-Programm berechnet.

einer Produktionsanlage durch Parallelisierung der Bearbeitungsschritte dann sinnvoll ist, wenn eine Steigerung des Durchsatzes erzielt werden soll.

Tabelle 4.6: Erkenntnisse aus der Optimierung durch Parallelisierung

- 1) Durch eine Parallelisierung von Bearbeitungsschritten kann die Durchlaufzeit DLZ nicht gesenkt werden; diese bleibt unverändert.
- 2) Durch Parallelisierung von Bearbeitungsschritten kann der Durchsatz D gesteigert werden.
- 3) Durch Parallelisierung der langsamsten Bearbeitungsschritte reduzieren sich die Leerzeiten.

4.4.1.2. Optimierung durch Reduzieren der Abrollvorgänge

In diesem Abschnitt wird das Produktionssystem nach der Zeit optimiert, indem mehrere Bearbeitungsstationen in einer Ab- und Aufrolleinheit zusammengefasst werden (vgl. Abb. 4.27). Durch das Zusammenfassen können Rüst- und Handlingzeiten reduziert werden, wodurch die Durchlaufzeit minimiert werden kann. Dabei stellt sich die Frage, wie viele Bearbeitungsstationen pro Ab- und Aufrollvorgang optimal sind.

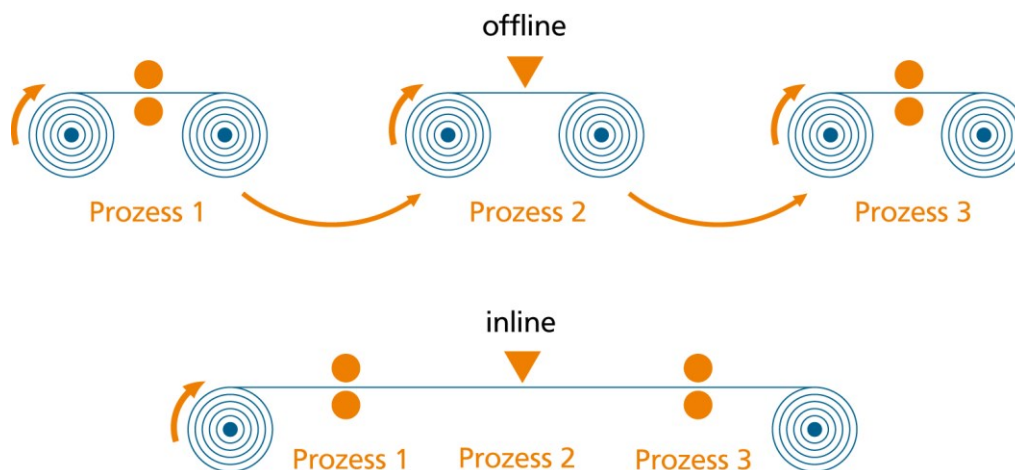


Abb. 4.27: Integration mehrerer Bearbeitungsstationen in einer Ab- und Aufrolleinheit

Werden nun mehrere Bearbeitungsschritte in eine Ab- und Aufrolleinheit integriert, fällt für den kompletten Abrollvorgang mit mehreren Bearbeitungsschritten nur einmal die fixe Rüstzeit an. Dazu addieren sich die variablen Rüstzeitanteile der integrierten Bearbeitungsschritte. „Werden beliebig viele getrennte

Abrollvorgänge mit je einem Bearbeitungsschritt mit einem Abrollvorgang mit gleich vielen integrierten Bearbeitungsschritten verglichen, so ergibt sich durch die Rüstzeit eine Zeitersparnis, die umso größer ausfällt, je mehr Druckwerke in den Abrollvorgang integriert sind.“⁵⁶² Abb. 4.28 zeigt den oben genannten Prozess mit der Aufteilung in fixe und variable Rüstzeiten. Die fixen Rüstzeiten wurden auf 4 ZE festgelegt und sind in Klammern neben den variablen Rüstzeiten über den Pfeilen beschrieben. Die Zahl unten rechts neben dem Symbol für den Inlineprozess steht für die Anzahl parallel ausgeführter Ab- und Aufrollvorgänge. Der orangene Kasten in Abb. 4.28 zeigt, dass diese sieben Bearbeitungsstationen in einer Ab- und Aufrolleinheit zusammengefasst sind. Da durch das Zusammenfassen mehrerer Bearbeitungsschritte in einen Ab- und Aufrollvorgang keine Leerzeit mehr anfallen kann, wird in diesem Falle zwischen zwei Ausprägungen von Leerzeiten unterschieden. Zum einen wird der Zeitunterschied zwischen verschiedenen Abrollvorgängen als Leerzeit $t_{Lz(i)}$ betrachtet. Zum zweiten wird auch die Zeit zwischen der technisch schnellstmöglichen realisierbaren Geschwindigkeit des Bearbeitungsschrittes i und des langsamsten in den Abrollvorgang integrierten Bearbeitungsschrittes i als Leerzeit $t_{Li(i)}$ betrachtet, da diese auch etwas über den Leistungsgrad einer Maschine aussagt.⁵⁶³

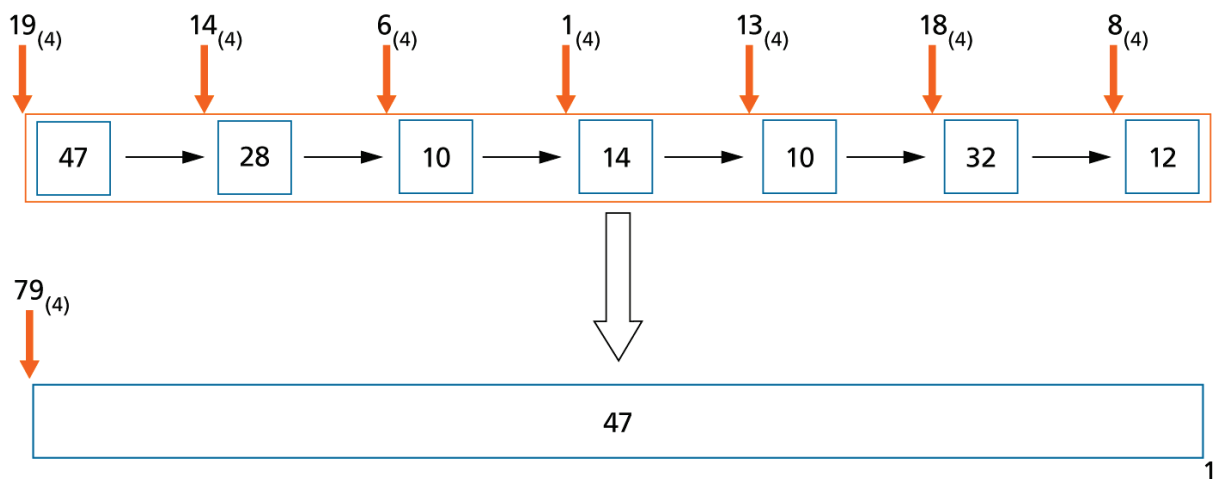


Abb. 4.28: Integration der sieben Bearbeitungsstationen des Modellprozesses in einer Ab- und Aufrolleinheit

Dadurch ändert sich die Formel für die Durchlaufzeit zu Formel 4.10. Dabei steht die Variable a für die Anzahl der Abrollvorgänge des gesamten Prozesses. Sind alle Bearbeitungsstationen in einen Abrollvorgang integriert, beträgt $a=1$.

⁵⁶² Uellner (2012).

⁵⁶³ vgl. Uellner (2012).

Somit fallen die fixen Rüstzeiten nur einmal an.⁵⁶⁴ Die Durchlaufzeit DLZ bestimmt sich nun aus dem langsamsten Abrollvorgang inklusive Rüstzeit $t_{R(i)}$, sodass die Durchlaufzeit DLZ 130 ZE beträgt. Wie Formel 4.11 zeigt, beträgt die Bearbeitungszeit t_{\max} des langsamsten Prozess 47 ZE, die Summe der variablen Rüstzeiten $t_{Rv(i)}$ 79 ZE und die fixe Rüstzeit $t_{Rf(i)}$ 4 ZE. In diesem Fall muss die Produktionsgeschwindigkeit der langsamsten Bearbeitungsstation angepasst werden.

$$DLZ = \sum_{i=1}^a t_{\max a(i)} + \sum_{j=1}^n t_{Rv(j)} + \sum_{k=1}^a t_{Rf(k)} \quad \text{Formel 4.10}$$

$$DLZ = 47 \text{ ZE} + 79 \text{ ZE} + 4 \text{ ZE} = 130 \text{ ZE} \quad \text{Formel 4.11}$$

Werden die Bearbeitungsstationen in mehr als einen Ab- und Aufrollvorgang aufgeteilt, verlängern sich die Durchlaufzeiten DLZ, da die fixen Rüstzeiten $t_{Rf(i)}$ für jeden Ab- und Aufrollvorgang anfallen. Außerdem müsste die maximale Bearbeitungszeit jedes Ab- und Aufrollvorgangs zu der Durchlaufzeit DLZ hinzugeaddiert werden. Mit einer Aufteilung in mehrere Abrollvorgänge kann der Durchsatz D verbessert werden, weil in diesem Falle mehrere Substratrollen gleichzeitig in dem Produktionssystem bearbeitet werden können. Da sich der zeitliche Durchsatz D_z aus der Summe von t_{\max} und den Rüstzeiten t_R berechnet, kann der Durchsatz nur dann verbessert werden, wenn der Bearbeitungsschritt mit t_{\max} nicht in den Ab- und Aufrollvorgang integriert wird. Nun stellt sich die Frage, inwieweit die Durchlaufzeit DLZ durch Integration mehrerer Bearbeitungsschritte in einen Ab- und Aufrollvorgang minimiert werden kann, unter der Nebenbedingung, dass der zeitliche Durchsatz D_z weiterhin minimal bei 70 ZE bleibt, wie es in dem Ausgangsbeispiel Abb. 4.24 der Fall ist. Der in Matlab programmierte Algorithmus nach Uellner (2012) optimiert diesen Fall zu drei Abrollvorgängen.⁵⁶⁵ Das Ergebnis ist in Abb. 4.29 dargestellt. Die obere Darstellung zeigt noch sieben Bearbeitungsstationen einzeln. Die Stationen, die zusammengefasst werden, sind bereits orange umrandet und als eine Bearbeitungsstation markiert. Die untere Darstellung behandelt die zusammengefassten Bearbeitungsstationen wie eine große Bearbeitungsstation. Die Rüst-

⁵⁶⁴ Uellner (2012).

⁵⁶⁵ vgl. Uellner (2012).

zeiten t_R und Bearbeitungszeiten t_B dieser neuen großen Bearbeitungsstationen wurden neu berechnet.

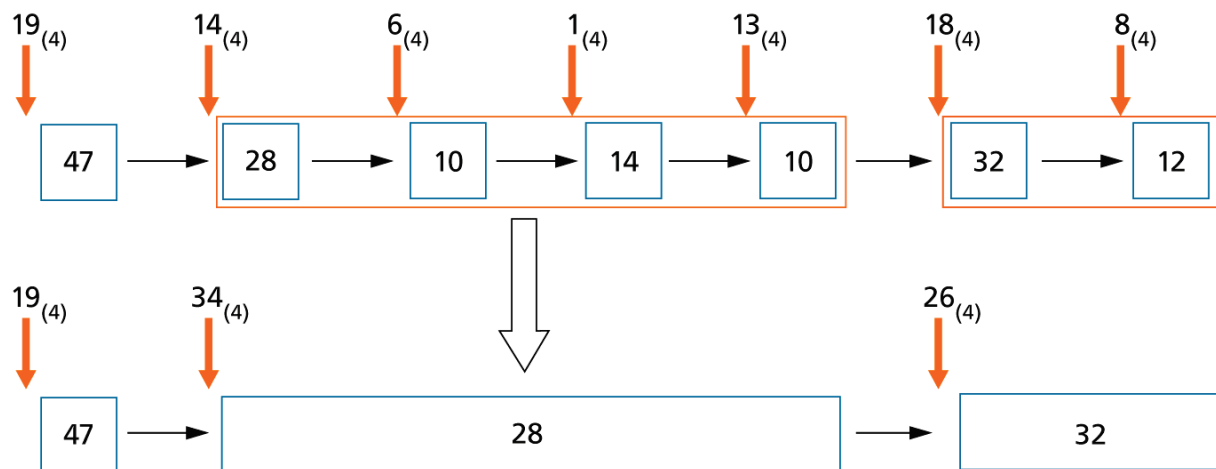


Abb. 4.29: Optimaler Prozess durch Minimierung der Ab- und Aufrollvorgänge. (System 2)

Der erste Bearbeitungsschritt, welcher der umfangreichste ist, wird in einer eigenen Ab- und Aufrolleinheit isoliert, damit dieser Bearbeitungsschritt nicht durch zusätzliche variable Rüstzeiten verlängert wird. In den zweiten Ab- und Aufrollvorgang werden die Schritte zwei bis fünf integriert und in den dritten werden die beiden letzten Bearbeitungsschritte integriert. Der zeitliche Durchsatz D_z wird in diesem Falle von dem umfangreichsten Bearbeitungsschritt $n=1$ bestimmt und beträgt $(47+19+4=70 \text{ ZE})$. Durch das Zusammenlegen einiger Bearbeitungsschritte konnte die Durchlaufzeit DLZ um 62 ZE auf 198 ZE reduziert werden.

Die Erkenntnisse aus der Optimierung durch Reduzierung der Abrollvorgänge sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass eine Optimierung einer Produktionsanlage durch die Reduzierung der Abrollvorgänge dann sinnvoll ist, wenn die Durchlaufzeit gesenkt werden soll.

Tabelle 4.7: Erkenntnisse aus der Optimierung durch Reduzierung der Abrollvorgänge

- 1) Durch eine Reduzierung der Ab- und Aufrollvorgänge kann die Durchlaufzeit gesenkt werden
- 2) Durch eine Reduzierung der Ab- und Aufrollvorgänge kann der zeitliche Durchsatz nicht optimiert werden.

4.4.1.3. Optimierung durch Parallelisieren und Reduzieren der Abrollvorgänge

In diesem Abschnitt werden die beiden zuvor einzeln vorgestellten Optimierungsmaßnahmen, Parallelisierung bei gleichzeitiger Minimierung der Ab- und Aufrollvorgänge, zusammen angewendet. Damit soll der Durchsatz D maximiert werden, und gleichzeitig die Durchlaufzeit DLZ und die Leerzeit t_L minimiert werden. Wie bereits mit Formel 4.7 berechnet, können maximal vier Maschinen pro Bearbeitungsstation parallel eingesetzt werden, um die Bearbeitungszeit aller Bearbeitungsstationen auf die minimale Bearbeitungszeit t_B zu reduzieren.

Die Produktivität des Produktionssystems kann auch über die Grenzen dieser hier vorgestellten Optimierung hinaus verbessert werden, indem die optimale Anordnung dupliziert wird, womit auch der Durchsatz D verdoppelt wird. In diesem Abschnitt soll nun der optimale Durchsatz D des Produktionssystems durch Parallelisieren der Bearbeitungsstationen erreicht werden, und die Durchlaufzeit DLZ durch Minimieren der Abrollvorgänge optimiert werden. Aufgrund der Erhöhung der Maschinenanzahl ändert sich die Berechnung des zeitlichen Durchsatzes D_z zu Formel 4.12.⁵⁶⁶

$$D_{z(a=1)} = \sum_{i=1}^a \frac{t_{max\ a(i)}}{m_a} + \sum_{j=1}^n \frac{t_{Rv}}{m_a} + \sum_{k=1}^a \frac{t_{Rf}}{m_a} \quad \text{Formel 4.12}$$

$$D_{z(a=2)} = \frac{28}{3} + \left(\frac{14}{3} + \frac{6}{3}\right) + \left(\frac{4}{3}\right) = 17,34 \quad \text{Formel 4.13}$$

Formel 4.13 zeigt die Berechnung für den zeitlichen Durchsatz der ersten und zweiten Bearbeitungsstationen, die zu einer Station zusammengefasst wurden. Die Ergebnisse der Berechnung mit Hilfe des Matlab-Codes sind in Tabelle 4.8 dargestellt. Für die Lösung liegt der zeitliche Durchsatz D_z bei 19 ZE, was auch dem Beispiel aus Kapitel 4.4.1.1 entspricht. Die Durchlaufzeit DLZ konnte allerdings durch Zusammenfassen von Bearbeitungsschritten von 260 ZE auf 216 ZE reduziert werden. Die gesamte Leerzeit beträgt 66 ZE.

⁵⁶⁶ vgl. Uellner (2012).

Tabelle 4.8: Ergebnisse der Optimierung durch Parallelisieren und Reduzieren der Abrollvorgänge

Bearbeitungsschritt	1	2	3	4	5	6	7	Σ
Maschinenanzahl m	4	3	3	1	4	4	4	-
Durchsatz der Maschine	11,8	9,3	3,3	14,0	2,5	8,0	3,0	-
Ab- & Aufrollvorgang Nr	1	2		3	4			-
Durchsatz des Abrollvorg.	17,50	17,34		19,00	18,75			-
Durchlaufzeit DLZ	70	52		19	75			216
tL im Abrollvorgang	-	-	18,00	-	22,00	-	20,00	60
tL zw. Abrollvorgängen	1,60	1,66	1,66	-	0,25	0,25	0,25	5,7
Gesamte Leerzeit tL	-	-	-	-	-	-	-	65,7

Diese Kombination mit optimalem zeitlichem Durchsatz D_z , bei optimaler Durchlaufzeit DLZ und geringster Leerzeit t_L ist in Abb. 4.30 übersichtlich dargestellt. Die erste Bearbeitungsstation wird mit vier Maschinen parallel betrieben. Die Bearbeitungsstationen zwei und drei werden zusammengefasst und mit drei Maschinen parallel betrieben. Während Bearbeitungsstation vier unverändert bleibt, werden die Bearbeitungsstationen fünf, sechs und sieben zusammengefasst und mit vier Maschinen parallel betrieben.

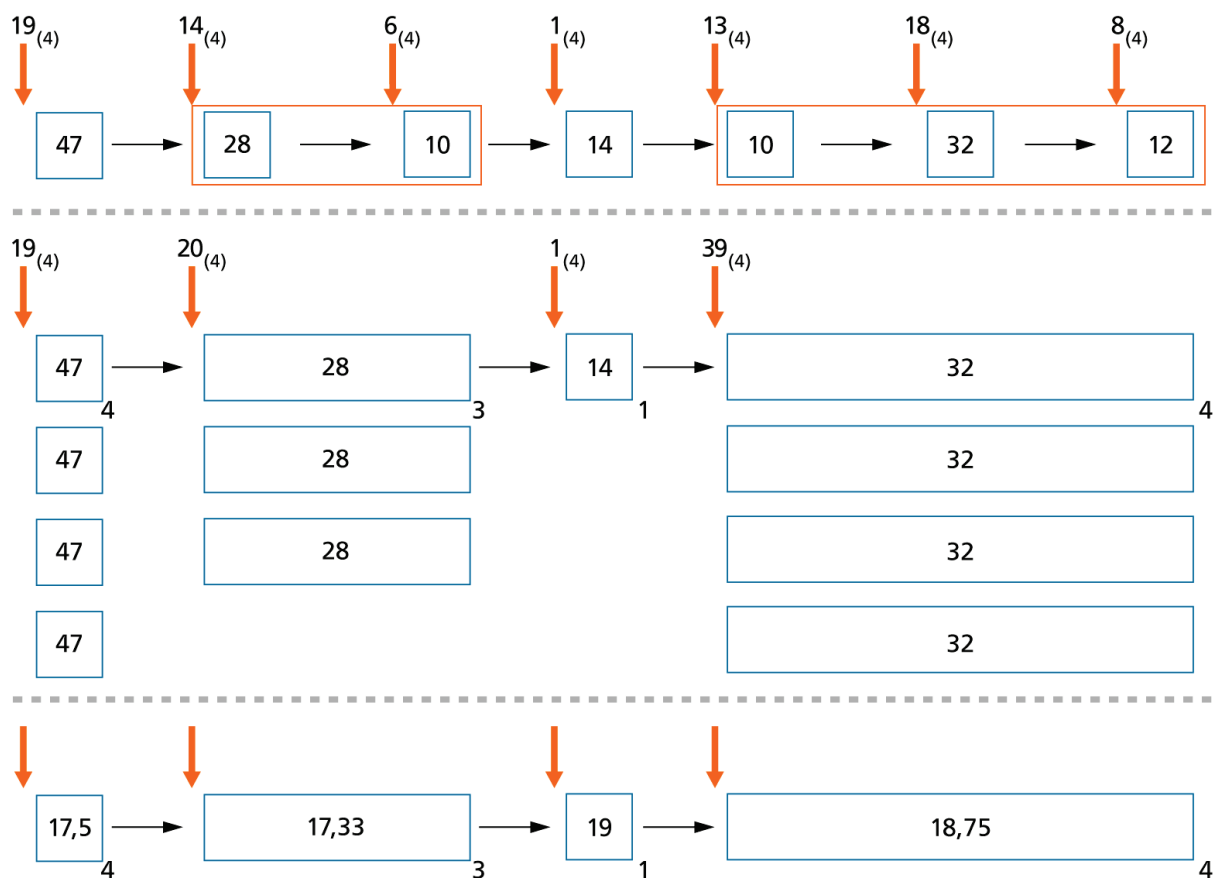


Abb. 4.30: Optimaler Prozess bei Parallelisierung der Bearbeitungsstationen bei gleichzeitiger Minimierung der Ab- und Aufrollvorgänge. (System 3)

Die Erkenntnisse aus der Optimierung sind in Tabelle 4.9 zusammengefasst. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass eine Optimierung einer Produktionsanlage durch Parallelisierung und Reduzierung der Abrollvorgänge den besten Kompromiss zwischen Maximierung des Durchsatzes und der Minimierung der Durchlaufzeit darstellt.

Tabelle 4.7: Erkenntnisse aus der Optimierung durch Parallelisierung und Reduzierung der Abrollvorgänge

- 1) Durch eine gleichzeitige Parallelisierung der Bearbeitungsstationen und Reduzierung der Ab- und Aufrollvorgänge, kann der Durchsatz erhöht und die Durchlaufzeit minimiert werden.
- 2) Die hier gefundene Lösung stellt dabei ein Kompromiss zwischen dem maximal möglichen Durchsatz und der minimalen Durchlaufzeit dar.

4.4.1.4. Optimierung durch automatischem Rollenwechsel

Bei Rollendruckmaschinen, die für die Produktion sehr hoher Auflagen eingesetzt werden, ist es üblich, einen automatischen Rollenwechsler einzusetzen.⁵⁶⁷ Der in Kapitel 4.1 dargestellten Systematik substratbasierter Fertigung folgend, kann somit eine ununterbrochene kontinuierliche Produktion erreicht werden. Diese Druckmaschinen haben eine Vorrichtung, womit der Substratvorrat immer wieder aufgefüllt werden kann, ohne die Maschine stoppen zu müssen. Dieser Rollenwechsler bevorratet neben der aktuell zu bedruckenden Substratrolle immer eine weitere Substratrolle. Die Übergabe der neuen Substratrolle an die Maschine ohne Druckunterbrechung. Hierzu wird ein Substratvorrat im Bahnspeicher angesammelt, der dann beim Rollenwechsel aufgebraucht wird. Hierzu wird die neue Substratrolle auf Maschinengeschwindigkeit beschleunigt und an die alte Substratbahn angeklebt. Im gleichen Augenblick wird die alte Substratbahn durchtrennt. Abb. 4.31 zeigt den schematischen Aufbau eines automatischen Rollenwechslers. Beim Einsatz eines automatischen Rollenwechslers fallen die Rüstzeiten nur zu Beginn einmal an. Bei einem Betrachtungshorizont vieler Bearbeitungszyklen können daher die fixen Rüstzeiten vernachlässigt werden.

⁵⁶⁷ Der automatische Rollenwechsel kommt in der graphischen Industrie bei hohen bis sehr hohen Auflagen zum Einsatz. Typische Anwendungen sind beispielsweise das Drucken von Tages- oder Wochenzeitungen sowie Zeitschriften mit hohen Auflagen.

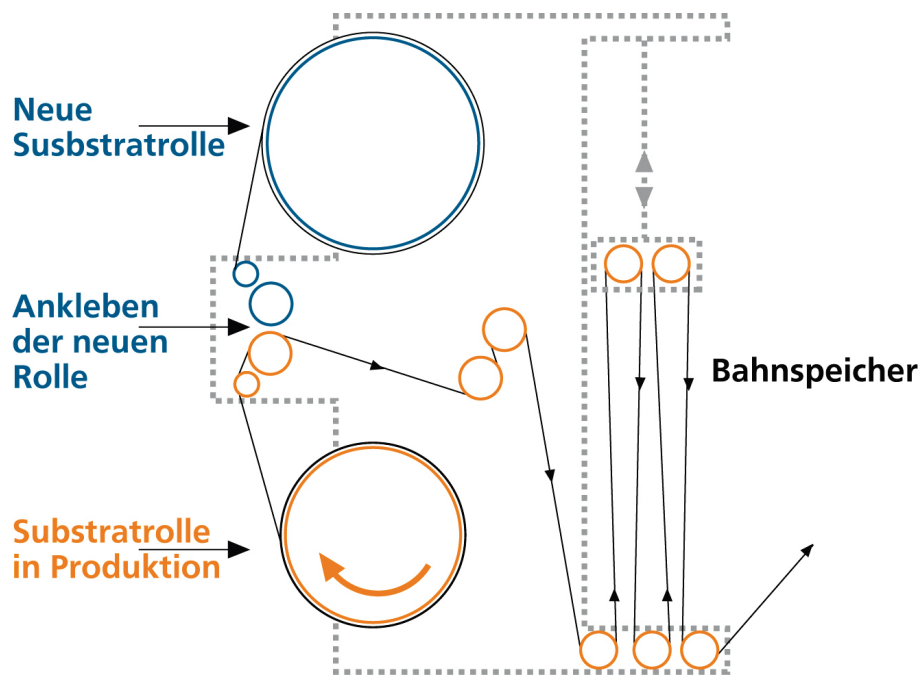


Abb. 4.31: Schematischer Aufbau eines automatischen Rollenwechslers

Ein automatischer Rollenwechsler lohnt sich nur, wenn alle Bearbeitungsschritte in einem Abrollvorgang integriert werden, da sonst die Rüstvorgänge nicht wegfallen. Diese sehr einfache Konstellation ist in Abb. 4.32 dargestellt.

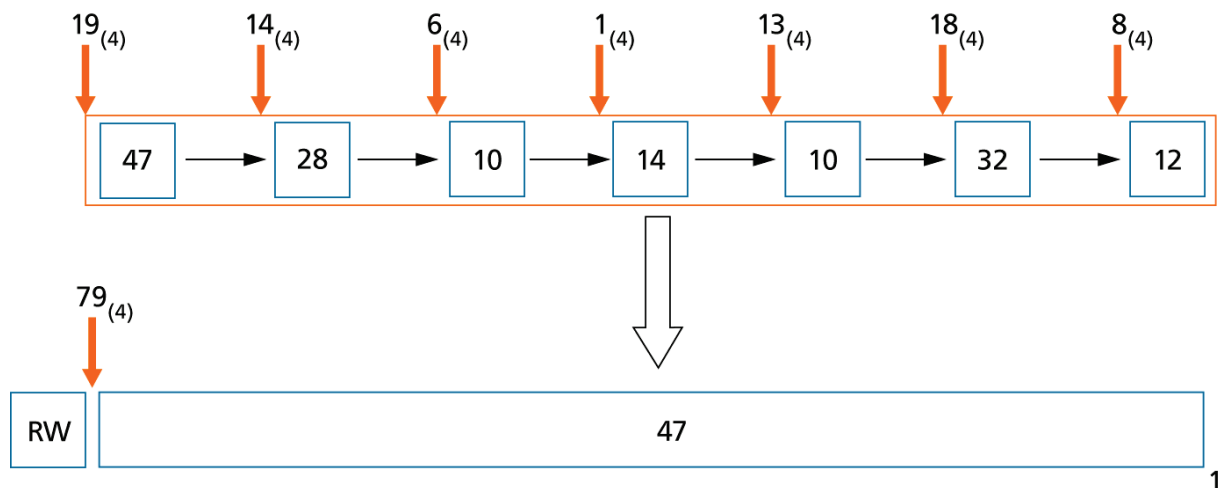


Abb. 4.32: Optimaler Prozess durch Integration aller Bearbeitungsstationen in eine Ab- und Aufrolleinheit und dem Einsatz eines automatischen Rollenwechslers (RW). (System 4)

Zusätzlich kann die Makulatur reduziert werden. „Werden alle Bearbeitungsschritte in einen Abrollvorgang integriert, kommt es nur im Bereich der Klebe-

stelle zu einem kleinen Ausschuss.“⁵⁶⁸ Durch diese Art des Produktionssystems mit einer Ab- und Aufrolleinheit und automatischem Rollenwechsler kann, ohne Parallelisierung, eine Durchlaufzeit DLZ von 47 ZE und ein zeitlicher Durchsatz D_z von 47 ZE erreicht werden.

4.4.1.5. Zusammenfassung der Optimierung des Produktionssystems nach der Zeit

Die Ergebnisse der in den letzten Abschnitten vorgestellten Verbesserungsmaßnahmen sind in Tabelle 4.10 dargestellt. Hierfür wurden die wichtigsten Ergebnisse der fünf vorgestellten Systeme zusammengetragen. Beim Vergleich der Ergebnisse wird deutlich, dass durch Parallelisierung von Bearbeitungsstationen der Durchsatz D deutlich verbessert werden kann und die Durchlaufzeit DLZ davon unberührt bleibt. Durch die Integration mehrerer Bearbeitungsstationen in eine Ab- und Aufrolleinheit ist es möglich, die Durchlaufzeit DLZ zu verringern. Der Durchsatz D verändert sich dabei nicht. Werden beide Maßnahmen parallel eingesetzt, können beide Größen deutlich verbessert werden. Wobei beide Werte unter den besten Werten liegen, die bei einer isolierten Anwendung der Maßnahmen erreicht werden können.

Tabelle 4.10: Zusammenfassung der Ergebnisse der unterschiedlichen Optimierungsstrategien

Beschreibung der Produktionssysteme				Durchlaufzeit	Leerzeit zwischen Abrollv.	Leerzeit im Abrollv.	zeitlicher Durchsatz pro Rolle	Durchsatz Substratrollen pro Stunde
Variante	Optimierung durch	Abroll-einheiten	Druckwerke					
System 1	Parallelisierung	17	17	260	63	0	19	1,84
System 2	Abrollvorgänge	3	7	198	12	70	70	0,50
System 3	Parallelisierung & Abrollvorgänge	12	23	216	60	6	19	1,84
System 4	Rollenwechsler	3	7	47	0	176	47	0,74

⁵⁶⁸ Uellner (2012).

Eine Sonderstellung nimmt die Lösung mit dem automatischen Rollenwechsel ein, da hierdurch die Durchlaufzeit DLZ und der Durchsatz D zusammen deutlich verbessert werden können. Die Durchlaufzeit DLZ ist in dieser Lösung gegenüber allen anderen Lösungen minimal, da bei dieser Lösung die fixen Rüstzeiten t_{Rf} vernachlässigt werden können und die variablen Rüstzeiten t_{Rv} deutlich reduziert werden können. Der zeitliche Durchsatz D_z liegt leicht über den besten Werten der Lösung, bei der die langsamsten Bearbeitungsstationen mit weiteren Maschinen parallelisiert wurden.

4.4.2. Optimierung des Produktionssystems nach der Qualität

Bei den zuvor vorgestellten Optimierungsstrategien eines Produktionssystems wurde die Qualität nicht beachtet. Die Vereinfachung war für das Modell zwar hilfreich, ist aber aus Produktsicht sehr problematisch. Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, kommt es bei der Qualität der Devices vor allem auf die Qualität der Schichten an, welche unter anderem von der Geschwindigkeit abhängt. So sind konstante Schichtendicken wichtig, um die Funktion des Devices sicherzustellen. Dies hat direkten Einfluss auf die Effizienz der Photovoltaikzelle. Außerdem führt unnötiger Fluidverbrauch zu höheren Kosten. Folglich hat dieser Parameter nicht nur Einfluss auf die Produktion, sondern nimmt auch direkten Einfluss auf die Qualität des Devices.

Daher scheint die Annahme, dass jeder Prozessschritt bei ausreichender Qualität mit beliebiger Geschwindigkeit durchgeführt werden kann, aus Qualitäts-sicht nicht haltbar. Jedes Fertigungsverfahren hat in dem Zusammenspiel mit der zu bedruckenden Oberfläche und dem zu verarbeitenden Funktionsfluid einen Geschwindigkeitsbereich, in dem optimale Ergebnisse erzielt werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird die Vereinfachung aufgelöst und die Geschwindigkeit darf in den Bearbeitungsstationen nur noch um $\pm 20\%$ ⁵⁶⁹ um die optimale Bearbeitungsgeschwindigkeit schwanken.

Diese Einschränkung der Bearbeitungszeiten bewirkt, dass nicht mehr alle Bearbeitungsschritte beliebig in Abrollvorgänge zusammengefasst werden können. Es können nur noch Bearbeitungsschritte zusammengefasst werden, wenn

⁵⁶⁹ Dieser Wert wurde beliebig gewählt und muss auf die jeweilige zu untersuchende Situation angepasst werden.

sich deren Bearbeitungszeitintervalle überschneiden. Dabei muss die folgende Bedingung erfüllt werden, die in Formel 4.14 beschrieben ist. In dieser Formel ist der Durchsatz D dargestellt.⁵⁷⁰

$$\text{Bedingung} = \begin{cases} D_{\max(i)} < D_{\min(i+1)} & ; \text{für } t_{B(i)} > t_{B(i+1)} \\ D_{\min(i)} > D_{\max(i+1)} & ; \text{für } t_{B(i)} < t_{B(i+1)} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{Formel} \\ 4.14 \end{matrix}$$

Für das System 2 in Abb. 4.29 wurde der optimale Prozess durch Minimierung der Ab- und Aufrollvorgänge unter Berücksichtigung der optimalen Bearbeitungsgeschwindigkeiten ermittelt. Für diese Lösung bedeutet das, dass nur die Bearbeitungsschritte 3 bis 5 in einen gemeinsamen Abrollvorgang zusammengefasst werden können. Für alle anderen Bearbeitungsstationen sind die Unterschiede in der Bearbeitungsgeschwindigkeit zu groß, um sie in eine Ab- und Aufrolleinheit zusammenzufassen. Die Lösung wurde nach dem in Matlab programmierten Algorithmus von Uellner (2012) berechnet.⁵⁷¹ Abb. 4.33 zeigt in der ersten Zeile das Produktionssystem ohne Berücksichtigung der optimalen Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Für das Produktionssystem sind in der zweiten Zeile die optimalen Bearbeitungsgeschwindigkeiten berücksichtigt. Für die Variante konnte der zeitliche Durchsatz D_z von 70 ZE beibehalten werden, während die Durchlaufzeit DLZ von 198 ZE auf 232 ZE gestiegen ist.

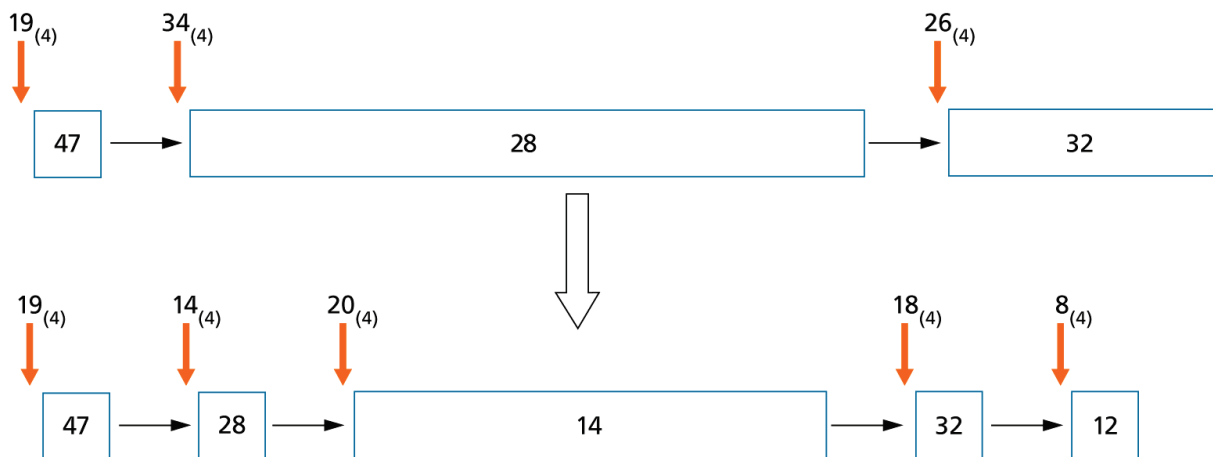


Abb. 4.33: Optimaler Prozess durch Minimierung der Ab- und Aufrollvorgänge unter Berücksichtigung der optimalen Bearbeitungsgeschwindigkeiten

⁵⁷⁰ vgl. Uellner (2012).

⁵⁷¹ vgl. Uellner (2012).

Für das System 3 in Abb. 4.30 wurde der optimale Prozess durch Parallelisierung der Bearbeitungsstationen und durch gleichzeitige Minimierung der Ab- und Aufrollvorgänge ermittelt. Werden für diese Lösung die optimalen Bearbeitungsgeschwindigkeiten berücksichtigt, können keine Bearbeitungsstationen mehr in eine Ab- und Aufrolleinheit zusammengefasst werden. Somit entspricht das Ergebnis wieder dem System 1, bei dem alle Bearbeitungsstationen eine eigene Ab- und Aufrolleinheit haben und bis auf die vierte Bearbeitungsstation mehrere Maschinen parallel zum Einsatz kommen. Abb. 4.34 zeigt in der ersten Zeile das Produktionssystem ohne Berücksichtigung der optimalen Bearbeitungsgeschwindigkeiten.

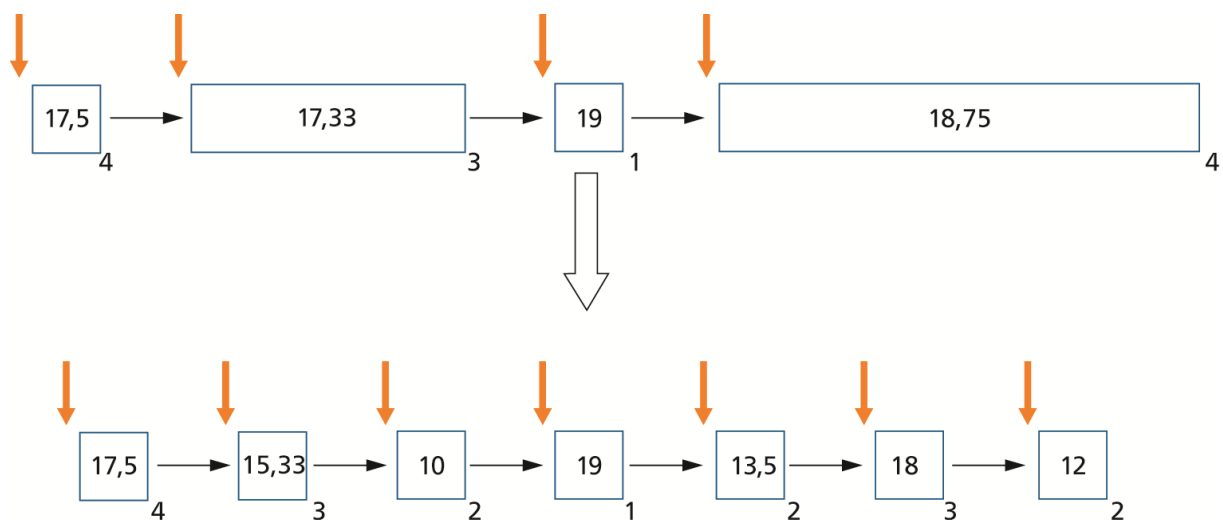


Abb. 4.34: Optimaler Prozess durch Parallelisierung von Bearbeitungsstationen und der Minimierung der Ab- und Aufrollvorgänge unter Berücksichtigung der optimalen Bearbeitungsgeschwindigkeiten

Für das Produktionssystem sind in der zweiten Zeile die optimalen Bearbeitungsgeschwindigkeiten berücksichtigt. Dadurch konnte der zeitliche Durchsatz D_z bei 19 ZE konstant gehalten werden, während die Durchlaufzeit DLZ von 198 ZE auf 260 ZE steigt.

Tabelle 4.11: Erkenntnisse aus der Optimierung unter Einschränkung der Geschwindigkeit

- 1) Unter Einschränkung der Geschwindigkeit kann der zeitliche Durchsatz D_z konstant gehalten werden.
- 2) Unter Einschränkung der Geschwindigkeit erhöht sich die Durchlaufzeit, weil mehr Ab- und Aufrollvorgänge in das Produktionssystem integriert werden müssen.

Nach der in Kapitel 4.1 vorgestellten Systematik substratbasierter Fertigung sind allerdings noch weitere Lösungen denkbar. Die dort vorgestellte Komponente „Substratbewegung“ unterscheidet zwischen kontinuierlicher und diskontinuierlicher Substratbewegung. Die von Uellner (2012) vorgestellten Algorithmen gehen immer von einer kontinuierlichen Substratbewegung aus. Erweitert man dieses Modell um die diskontinuierliche Substratbewegung, fallen einige Einschränkungen weg.

Durch den Einbau von Pufferspeichern für das Substrat ist es möglich, das Substrat mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durch die Maschine zu bewegen. An den Bearbeitungsstationen, die eine höhere Geschwindigkeit benötigen, kommt es dabei zu einer diskontinuierlichen, teilweise auch unterbrochenen, Substratbewegung. Das Substrat kommt mit einer niedrigen Geschwindigkeit an, und füllt den Substratspeicher. Ist dieser gefüllt, kann das Substrat mit einer höheren Geschwindigkeit durch die nächste Bearbeitungsstation transportiert werden. Ist der Substratspeicher leer, muss das Substrat in dieser Station gestoppt werden bis der Speicher wieder gefüllt ist. Diese Maschinen benötigen Direktantriebe, damit an den Stationen unterschiedliche Geschwindigkeiten realisiert werden können. Handelt es sich um Rollenmaschinen, muss zu jedem Substratspeicher eine zusätzliche Bahnspannungsregelung integriert werden, damit in dem Abschnitt die Geschwindigkeit unabhängig geregelt werden kann.

Werden also Substratspeicher in eine Maschine eingebaut, kann das Substrat mit unterschiedlicher Geschwindigkeit innerhalb eines Abrollvorgangs durch die Bearbeitungsstationen bewegt werden. Somit fallen einige Einschränkungen aus Tabelle 4.3 weg. Dadurch haben die Lösungen, die in Tabelle 4.10 zusammengefasst wurden, keine Einschränkungen bezüglich der Qualität auf Grund ungünstiger Geschwindigkeiten. Allerdings steigt der Aufwand und somit der Preis und der Platzbedarf der Maschine ein wenig, da Pufferspeicher miteingebaut werden müssen. Die Kosten für den Substratspeicher selbst halten sich in Grenzen, aber die zusätzliche Bahnspannungsregelung ist aufwendig und muss in die Steuerung integriert werden.

Bei dem Einsatz eines Substratspeichers kann es zu Problemen kommen, wenn das nach dem Substratspeicher eingesetzte Fertigungsverfahren einen Gleichgewichtsprozess voraussetzt. Dies ist vor allem bei Druckverfahren der Fall, bei

denen es zu einer Fluidspaltung kommt wie beispielsweise dem Flexodruck.⁵⁷² Um eine konstante Qualität der Schichten zu erreichen, müssen die Prozesse kontinuierlich ablaufen. Allerdings müssen diese Prozesse beim Einsatz eines Substratpuffers gestoppt werden, damit der Puffer gefüllt und das Substrat mit höherer Geschwindigkeit durch die Bearbeitungsstation transportiert werden kann. Dabei können einige Umdrehungen des Druckformzylinders notwendig sein, bis der Gleichgewichtszustand erneut erreicht wird und somit Schichten gleicher Qualität erzeugt werden können. Bei einem Durchmesser des Druckformzylinders von angenommenen 0,5 m, kommt es bei n Umdrehungen zu einer Makulatur von:

$$Makulatur > n * \pi * 0,5m \quad \text{Formel 4.15}$$

Diese Makulatur würde dann nach jedem Entleeren des Substratspeichers anfallen. Somit gilt für Produktionsanlagen mit Substratspeicher, dass keine Fertigungsverfahren direkt nach dem Substratspeicher zum Einsatz kommen dürfen, die einen Gleichgewichtsprozess voraussetzen. Diese Verfahren können ohne Einschränkung direkt vor oder zwei Stationen nach dem Substratspeicher eingesetzt werden.

4.4.3. Optimierung des Produktionssystems nach dem Zeitpunkt der Vereinzelung

In dem Kapitel 4.3.2 wurden vier mögliche Substrattransportmethoden vorgestellt. In dem Kapitel 4.4.1 wurde die Frage nach der optimalen Anordnung der einzelnen Bearbeitungsstationen beispielhaft für Rollensubstrate diskutiert. In all diesen Fällen wurde davon ausgegangen, dass innerhalb des Produktionssystems nur eine Art von Substrat vorliegen kann. Die in Kapitel 4.3.2.4 vorgestellte Substrattransportmethode Roll-to-Sheet stellt eine Ausnahme dar. Allerdings wird in dem Beispiel das Substrat noch vor dem eigentlichen Fertigungsprozess zu Bogen vereinzelt, so dass innerhalb der Systemgrenzen des Fertigungsprozesses an allen Bearbeitungsstationen Bogensubstrate vorliegen.

In der folgenden Betrachtung werden diese engen Systemgrenzen erweitert. Der in Abb. 4.35 dargestellte Prozess zeigt die bisherigen Systemgrenzen, in

⁵⁷² vgl. Kapitel 2.2.1

denen das Substrat als Halbzeug eingebracht wird. Wird nun die Systemgrenze bis zur Herstellung des Substrats erweitert, wird deutlich, dass viele Substrate wie Folie und Papier direkt als Endlosprozess produziert werden und auf Rollen verkauft werden. Sollen diese Substrate als Bogensubstrate verkauft werden, müssen diese von einer Rolle vereinzelt werden. Wird die Systemgrenze in Richtung des Endprodukts erweitert, wird klar, dass die auf einer Rolle produzierten Devices zu Einzelnutzen vereinzelt werden müssen. Es ist eher als unwahrscheinlich anzusehen, dass die Devices der druckbaren Elektronik als kilometerlange Endprodukte verkauft werden. Zumindest werden die Produkte in den meisten Fällen als Bogen bzw. Einzelnutzen verkauft.

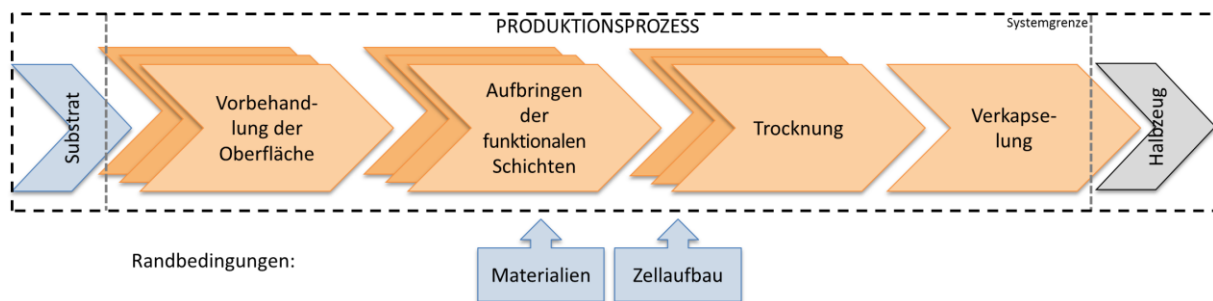


Abb. 4.35: Erweiterung der Systemgrenze um den Fertigungsprozess der Druckbaren Elektronik

Mit der Erweiterung der Systemgrenze erscheint die Frage, ob Roll-to-Roll oder Sheet-to-Sheet das bessere Konzept ist, eher unpassend, da in jedem Fall die Rolle zu Einzelnutzen vereinzelt wird. Aus dieser Perspektive stellt sich vielmehr die Frage, ab wann es sinnvoll ist, das Rollensubstrat zu Bogensubstraten zu vereinzeln. Der Vereinzlungsschritt ist unumgänglich. Aus der Betrachtung heraus stellt sich die Frage, welche Vorteile das Vereinzeln von dem Rollensubstrat zu Bogen innerhalb des Produktionsprozesses von druckbarer Elektronik hat. Nun ist vorstellbar, dass bestimmte Bearbeitungsstationen von einer bestimmten Substrattransportmethode profitieren würden. Ist zum Beispiel für eine bestimmte Schicht eine höhere Registergenauigkeit notwendig, kann diese mit einem Bogensubstrat besser umgesetzt werden.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit mit Bogensubstraten einzelne Fertigungsschritte deutlich einfacher parallelisieren zu können. Soll ein langsamer Prozessschritt bei einem Rollentransport parallelisiert werden, müssen die Substratrollen zuvor wieder auf Rollen aufgewickelt werden, um dann auf zwei neue Abrolleinheiten abwechselnd verteilt werden zu können. Dadurch fallen

jedes Mal Rüstzeiten und Transportzeiten an. Würde vor diesem Engpass das Rollensubstrat zu Bogen vereinzelt, könnten diese Bogen abwechselnd voll automatisiert auf die zwei nachfolgenden Bearbeitungsstationen verteilt werden, ohne dass Rüstzeiten anfallen würden. Das Produktionssystem kann so ohne Unterbrechung produzieren.

In der vom Autor betreuten Studienarbeit von Schmidt (2012) wurde der Frage nachgegangen, wann genau der optimale Zeitpunkt der Vereinzelung im Produktionsprozess von organischer Photovoltaik ist.⁵⁷³ In seiner mathematischen Modellierung betrachtet Schmidt allerdings nur die Investitionskosten. Ziel seines Modells ist die minimale Investitionssumme aller möglichen Kombinationen der Bearbeitungsstationen. Die einzelnen Bearbeitungsstationen können dabei mit Bogen- oder Rollensubstraten bestückt werden. Die Nebenbedingung lautet, dass sobald eine Station mit Bogensubstraten bestückt wird, nur noch Stationen mit Bogensubstraten in das Produktionssystem aufgenommen werden können. In diesem Modell ist jede Bearbeitungsstation autonom betreibbar, da ein Zusammenfassen mehrerer Bearbeitungsstationen in einen Abrollvorgang nicht vorgesehen ist.⁵⁷⁴ Als Datenbasis dienen die Anschaffungspreise der Labormaschinen aus dem Labor von dem Risø DTU, Technical University of Denmark.⁵⁷⁵ Diese Daten sind für eine industrielle Produktion nicht aussagekräftig. Die Anschaffungskosten für die Maschinen als Bogenmaschinen wurden geschätzt. Das Ergebnis dieses Modells mit den geschätzten Investitionskosten ist somit nicht belastbar. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass sich die Ergebnisse bereits ändern, wenn die Investitionskosten um nur 4% schwanken.⁵⁷⁶ Somit sind die Aussagen dieses Modells nicht auf andere Systeme übertragbar. Zum einen ist die Datenbasis zu schlecht, und zum anderen wurden wichtige Einflussgrößen außer Acht gelassen. Der Einfluss der Vereinzelung einer Substratrolle zu Bogen innerhalb des Produktionssystems auf Durchlaufzeit DLZ und Durchsatz D wurden nicht betrachtet. Werden nur die Anschaffungskosten betrachtet, wird der eigentliche technologische Vorteil nicht miteinbezogen. Um auf diese Frage eine Antwort zu erhalten, müssen zunächst die Auswirkungen einer Vereinzelung des Rollensubstrats in Bogen innerhalb des Produktionssys-

⁵⁷³ vgl. Schmidt (2012).

⁵⁷⁴ vgl. Schmidt (2012).

⁵⁷⁵ vgl. Krebs/Tromholt/Jorgensen (2010).

⁵⁷⁶ vgl. Schmidt (2012).

tems auf den Durchsatz und die Durchlaufzeit bestimmt werden. Die Auswertung könnte mit den Algorithmen von Uellner (2012) erfolgen.

4.4.4. Substrathandling in der Produktion

In Kapitel 4.3 wurden vier Methoden zum Transport von Substraten innerhalb einer Produktionsanlage vorgestellt. In einer Produktion muss allerdings das Substrat auch zur Produktionsanlage hin, zwischen einzelnen Bearbeitungsstationen und von der Produktionsanlage weg transportiert werden. Diese Transportwege „außerhalb“ der Produktionsanlage werden in diesem Kapitel unter Substrathandling zusammengefasst. Bei einer substratbasierten Fertigung kann das Substrat als Rolle oder Bogenstapel vorliegen. Da diese beiden Fälle unterschiedliche Lösungen erfordern, werden diese getrennt betrachtet. Außerhalb der Produktionsanlage werden nicht mehr einzelne Bogensubstrate oder Rollensubstratsegmente transportiert, sondern Stapel mit Bogensubstraten oder ganze Substratrollen transportiert. Daraus resultieren andere Herausforderungen, als beim möglichst exakten Fördern des Substrats innerhalb der Produktionsanlage.

Handling von Bogensubstraten

Beim Handling von Bogensubstraten muss zunächst geklärt sein, welches Substratmaterial zum Einsatz kommt. Biegesteife Substrate wie Glas- oder Metallsubstrate bedeuten andere Herausforderungen als flexible Substrate wie PET-Folie. Bei biegesteifen Glas- und Metallsubstrate muss beachtet werden, ob diese direkt aufeinander gestapelt werden können, oder ob eine Schutzfolie notwendig wird, um die empfindlichen Schichten vor Beschädigungen zu schützen. Im Gegensatz zu Foliensubstraten, haben die starren Substrate ein größeres Volumen, eine höhere Dichte und somit ein deutlich höheres Gewicht. Für das Handling bedeutet dies, dass bei einer (Massen-) Produktion mehr und deutlich schwerere Substratstapel transportiert werden müssen. Auch die Zwischen- und Endlager müssen dadurch größer dimensioniert werden.

Tabelle 4.12: Gewicht und Eigenschaften von Substratstapeln bzw. -rollen.

Substratsorte	Dichte	Dicke	Eigenschaften des Substratstapels	Gewicht eines Stapels	Maße der Substratrolle	Gewicht einer Rolle
	in kg/m ³	in µm		in kg		in kg
PET-Folie	1.380	125	2.500 Bogen à 1m ²	431	1m breit, 5.000m lang	863
Glas-Substrat	2.500	300	1.000 Bogen à 1m ²	750	1m breit, 2.000m lang	1.500
		100	2.500 Bogen à 1m ²	625	1m breit, 5.000m lang	1.250

Das Gewicht eines Stapels aus 1.000 ca. 300 μm dicken Glassubstraten würde bei einer angenommen Größe des Substrats von 1 m^2 ca. 750 kg wiegen. Dieser Stapel wäre in etwa 0,3 m hoch. Das Gewicht des Substrats spielt auch bei den Foliensubstraten eine Rolle. Zwar ist deren Dichte geringer, aber dafür werden deutlich mehr Bogen auf einem Stapel abgelegt. Bei einer angenommenen Substratgröße von 1 m^2 und einem Substratgewicht von 125 gr/m^2 , summiert sich das bei ca. 2.500 gestapelten Bogen auf ca. 431 kg. Somit muss auch bei den flexiblen Substraten geklärt werden, ob bei solchen Gewichtskräften die aufgebrauchten Funktionsschichten diese Belastung aushalten.

Werden bereits bedruckte Substrate erneut von einem Substratstapel vereinzelt, um weiterverarbeitet zu werden, wird der oberste Bogen vereinzelt und vom Stapel gezogen. Dadurch reiben die Bogen aufeinander. Sind nicht alle Prozessschritte in einer Maschine zusammengefasst, kommt bei jeder neuen Bearbeitungsstation ein solcher Vereinzlungsschritt hinzu. Daher muss geklärt werden, ob dies Auswirkungen auf die oberste Schicht hat. Werden zwei Bogen voneinander getrennt, kommt es zur Trennung elektrischer Ladungen. Dadurch können sich die Substrate statisch aufladen. Das hat Auswirkungen auf die Eigenschaften der aufgetragenen Schicht und kann ggf. auch Auswirkungen auf die gedruckten Devices haben. In dieser Situation können die Substrate mit stark ionisierter Luft bearbeitet werden, so dass die statische Aufladung abgebaut werden kann.

Handling von Rollensubstraten

Werden Substrate in Rollenform eingesetzt, kommen nur flexible Materialien in Frage. Dazu zählen Papier, Kunststoff-Folie, Metall-Folie und Dünnglas⁵⁷⁷. Papier scheint aus der heutigen Sicht nicht ohne weitere Anpassungen für die druckbare Elektronik geeignet. Dünnglas ist eine sehr neue Entwicklung, die großes Potential in der druckbaren Elektronik hat. Für diesen Abschnitt werden zunächst die Kunststoff-Folien näher betrachtet. Auch bei einem Rollensubstrat müssen ähnliche Fragen wie bei einem Bogensubstrat geklärt werden.

Zum einen stellt sich die Frage nach der Belastung der Schichten durch das Eigengewicht. Bei einer ein Meter breiten und 5.000 m langen Substratrolle aus PET, wiegt eine Substratrolle ca. 863 kg. Bei einer Rolle stellt sich bereits die

⁵⁷⁷ Wird auch als Glas-Folie bezeichnet.

Frage, wie sie gelagert wird, und welche Belastung auf die Schicht dabei wirkt. Solche großen Rollen wurden bisher in der Druckindustrie mit Rollenstapler transportiert, die diese Rollen mit einer Greifzange greifen (s. Abb. 4.36).⁵⁷⁸

Wird das Rollensubstrat nicht direkt inline in einer Maschine zu Einzelnutzen weiterverarbeitet, muss am Ende einer Maschine das Substrat wieder aufgewickelt werden. Sind nicht alle Prozessschritte in einer Maschine zusammengefasst, muss das Substrat für jede Bearbeitungsstation ab- und wieder aufgewickelt werden. Dabei stellt sich die Frage, welchen Einfluss diese Wickelvorgänge auf die Schichten haben. Beim Aufwickeln von Substraten kann es vor allem bei kompressiblen Materialien mit hohem Reibkoeffizienten zu Lagenverschiebungen und zu anderen großen Fehlern in der Wicklung führen,⁵⁷⁹ deren Auswirkungen auf die funktionalen Schichten untersucht werden müssen.



Abb. 4.36: Handling einer Papier-Substratrolle mit einem speziellen Rollenstapler
Quelle: In Anlehnung an ETG Print Medien Logistik GmbH (2012)

Beim Aufwickeln stellt sich auch die Frage, wie klein darf der Durchmesser werden, damit das Substrat und vor allem die aufgebrachten Schichten keinen Schaden nehmen. So sind zum Beispiel ITO-Schichten und Schichten aus anderen TCO-Materialien⁵⁸⁰ extrem empfindlich gegenüber Biegebeanspruchung. Diese Materialien sind spröde. Bei zu starker Belastung wie zu starkes Biegen oder zu häufiges Biegen, können in dieser Schicht Mikrorisse entstehen oder sogar delaminieren. Dies verschlechtert die Leitfähigkeit und kann zum Bau-

⁵⁷⁸ ETG Print Medien Logistik GmbH (2012).

⁵⁷⁹ vgl. Hoffmann (2010).; vgl. Hoffmann/Desch/Dörsam (2011).

⁵⁸⁰ Der englische Begriff TCO – Transparent conductive Oxide steht für transparente, leitfähige Oxide. Beispiele hierfür sind neben dem ITO auch aluminium-, gallium- oder fluordotiertes Zinnoxid.

teilversagen führen.⁵⁸¹ Neben der Frage des minimalen Biegeradius, spielt es auch eine Rolle, wie häufig der Schichtverbund gebogen, bzw. auf- und abgewickelt wird.

Die genannten Einflüsse auf eine ITO-Schicht müssen auch auf den kompletten Schichtstapel, der zur Funktion notwendig ist, untersucht werden. So reagieren das Substrat und die aufgetragenen Schichten, die aus verschiedenen Materialien bestehen, unterschiedlich auf Temperaturänderungen, Luftfeuchte oder Biegung. Der Einfluss von Biegung ist Gegenstand der aktuellen Forschung.⁵⁸² „Besonders in den Bereichen, wo verschiedene funktionale Materialien zusammentreffen, können Spannungskonzentrationen entstehen, die nicht nur die strukturelle Integrität, sondern auch die elektronische Funktionalität beeinträchtigen.“⁵⁸³

⁵⁸¹ vgl. Müller-Meskamp u. a. (2012).

⁵⁸² vgl. Dieringer/Becker (2012).; vgl. Dieringer u. a. (2011).

⁵⁸³ Dieringer/Becker (2012).

4.5. Zusammenfassung

Zu Beginn des Kapitels wurde erstmals eine Systematik hergeleitet, welche grundlegend jede Art von substratbasierter Produktion beschreibt (Kapitel 4.1). Diese definiert die Besonderheiten substratbasierter Produktion. Danach wurden die drei in Kapitel 3 identifizierten Haupteinflussparameter im Detail analysiert und Lösungsansätze erarbeitet:

Auswahl der Fertigungsverfahren, die Auswahl der Substrattransportmethode sowie die Anordnung der ausgewählten Bearbeitungsstationen zu einem Produktionssystem.

In Kapitel 4.2 wurde erstmals eine Systematik zur Auswahl eines Fertigungsverfahrens für die druckbare Elektronik erarbeitet. Hierfür wurden zunächst Bewertungskriterien für die Auswahl identifiziert und im Detail beschrieben. Daraufhin wurde der iterative Charakter des Upscalings mit dem dreistufigen Upscalingprozess nach Dörsam beschrieben. Daraus wurde ein Ablaufplan zur Auswahl eines Fertigungsverfahrens zur Herstellung von funktionalen Schichten erstellt. Eine Matrix mit den notwendigen Bewertungskriterien von ausgewählten Fertigungsverfahren ergänzt den Ablaufplan. Im zweiten Abschnitt wurde der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Produktion für vakuumbasierte und vakuumlose Verfahren untersucht.

In Kapitel 4.3 wurde der Einfluss der Substrattransportmethode auf die Produktion untersucht. Hierfür wurden zunächst die Anforderungen der druckbaren Elektronik an den Substrattransport beschrieben. Dann wurden erstmals vier mögliche Substrattransportmethoden identifiziert und im Detail beschrieben. Danach wurde eine Hierarchie mit 19 Charakteristiken des Substrattransports und fünf Oberkriterien erstellt, welche sich an der Maschinenselektion im klassischen Maschinenbau orientiert. Anhand dieser Hierarchie kann ein Auswahlprozess bezüglich einer Substrattransportmethode durchgeführt werden. Für die jeweilige Situation gilt es die Attribute zu gewichten.

Kapitel 4.4 beschreibt den Einfluss der Struktur eines Produktionssystems auf die Auslegung einer Anlage. Hierfür wurden unterschiedliche Lösungen zur Anordnung von Bearbeitungseinheiten zu einem optimalen Produktionssystem analysiert und optimiert. Hierfür wurden die Produktionssysteme nach der Zeit,

nach der Qualität und nach dem Zeitpunkt der Vereinzelung untersucht. Hierfür konnten fünf alternative Anordnungen eines Produktionssystems erarbeitet werden. Im letzten Abschnitt wurden die Besonderheiten des Handlings von Substraten in einer Produktion beschrieben.

Somit sind die drei Haupteinflussparameter einer Produktion druckbarer Elektronik, Fertigungsverfahren, Substrattransport und Anordnung zu einem optimalen Produktionssystem, beschrieben und werden im nächsten Kapitel mit dem Innovationsprozess der druckbaren Elektronik ergänzt.

5. Innovationsprozess der druckbaren Elektronik

Im dritten Kapitel wurde grundsätzlich untersucht, welche Kriterien einen Einfluss auf die Planung einer Produktion von druckbarer Elektronik haben. Diese Kriterien wurden beschrieben und deren technischer und wirtschaftlicher Einfluss analysiert. Daraus wurden Hypothesen abgeleitet. Die drei wichtigsten Einflussparameter „Fertigungsverfahren“, „Substrattransport“ und „Anordnung zu einem optimalen Produktionssystem“ wurden im vierten Kapitel im Detail untersucht und Lösungen erarbeitet. In dem folgenden Abschnitt werden die Erkenntnisse aus den Kapiteln drei und vier zusammengeführt, so dass diese für eine zukünftige Planung einer Produktion von druckbarer Elektronik nutzbar sind. Die erarbeiteten Erkenntnisse werden im folgenden Abschnitt in den Innovationsprozess der druckbaren Elektronik eingebunden, und eine Systematik abgeleitet.

Ziel dieses Kapitels ist es, einen Weg von der Idee hin zu der Produktion für die druckbare Elektronik aufzuzeigen. Hierfür werden zunächst in Kapitel 5.1 die Grundlagen zu Innovationen und Innovationsprozessen dargestellt. In Kapitel 5.2 wird aus den erarbeiteten Erkenntnissen ein angepasster Innovationsprozess für die druckbare Elektronik entwickelt.

5.1. Grundlagen des Innovationsprozesses

Der Ursprung des Begriffes Innovation liegt im lateinischen Wort *innovatio* und bezeichnet eine Neuerung.⁵⁸⁴ In der Literatur existieren viele Kriterien, um den Begriff der Innovation zu charakterisieren. Neben der Differenzierung nach dem Innovationsobjekt „Was ist neu?“, nach dem Innovationsgrad „Wie sehr neu?“ und nach der Bezugseinheit „Für wen neu?“, kann auch nach den Aktivitäten differenziert werden „Wo beginnen und wo enden die Innovationsaktivi-

⁵⁸⁴ vgl. Vahs/Burmester (2002).

täten?“. In dieser Arbeit ist vor allem die letzte, die prozessorientierte⁵⁸⁵ Sicht von Bedeutung.

Joseph Schumpeter war der erste, der den Innovationsprozess bereits 1911 näher beschrieb. Er entdeckte die Bedeutung neuer Kombinationen von Produktionsfaktoren. Schumpeter spricht dabei von der „Durchsetzung neuer Kombinationen“ und beschreibt dabei die Innovation als die neue Art Faktoren miteinander zu kombinieren. Er sah den Unternehmer als „schöpferischen Zerstörer“, da diese neuen Kombinationen etablierte Produkte und Praktiken verdrängen müssen um selbst erfolgreich zu sein. Eine Innovation führt zu einem Marktungleichgewicht zu Gunsten des neuen innovativen Produktes. Die Rente für diese Neuerung stellt den Unternehmergewinn dar. Der innovative Unternehmer kann zunächst einen Monopolgewinn erzielen. Dieser bringt Nachahmer in den Markt, so dass diese Rente mit der Zeit unter allen Wettbewerbern aufgeteilt wird.⁵⁸⁶

Schumpeter teilte den Innovationsprozess in drei aufeinander folgende Phasen: die Inventions-, Innovations- und Diffusionsphase ein. In der Inventionsphase werden zunächst erste Entwürfe von Produkt- oder Prozessideen angefertigt. In der Innovationsphase wird ein entwickelter Prozess oder ein Produkt in den Markt eingeführt. In der Diffusionsphase setzt sich die Innovation am Markt durch.⁵⁸⁷ Bis heute wurden sehr viele Darstellungsformen des Innovationsprozesses in der Literatur diskutiert.⁵⁸⁸ Innovationen sind durch Besonderheiten gekennzeichnet, aufgrund derer sich Innovationsprozesse von anderen Prozessen stark unterscheiden.⁵⁸⁹

1) Innovationsprozesse und die darin zu treffenden Entscheidungen sind sehr komplex. Die **Komplexität** entsteht durch Interaktion vieler Elemente (z. B. Mitarbeiter, Abteilungen) eines Systems (z. B. das Unternehmen) sowie der Umwelt (z. B. Märkte, Konkurrenten) und wird durch die Vielzahl und Veränderlichkeit der Elemente, der Strukturen und der Relationen bestimmt.⁵⁹⁰

⁵⁸⁵ Ein Prozess ist eine Folge von sachlich und zeitlich zusammenhängenden Aktivitäten und Entscheidungen mit definiertem Anfang und Ende. Vgl. Gerpott (2005).

⁵⁸⁶ vgl. Schumpeter (1911); Schumpeter (2002).

⁵⁸⁷ vgl. Schumpeter (1926).

⁵⁸⁸ Eine ausführliche Betrachtung einiger unterschiedlichen Darstellungsweisen des Innovationsprozesses findet sich in Wolfrum (1994).

⁵⁸⁹ Eine ausführliche Betrachtung der Besonderheiten des Innovationsprozesses findet sich in Hagenhoff (2008).

⁵⁹⁰ vgl. Specht/Möhrle (2002).

- 2) Die Durchsetzung von Inventionen stößt bei der Einführung in Märkte oder Unternehmen auf **Widerstände**. Betroffene Partner, Konkurrenten oder Mitarbeiter sind „in ihrem Bewusstsein dem Status-Quo verhaftet“.⁵⁹¹
- 3) Die zu treffenden **Entscheidungen** und das Durchsetzen eben dieser sind voneinander **nicht trennbar**. Das bedeutet, dass eine Entscheidung und deren Durchsetzung zeitgleich stattfinden und nicht sequenziell abgearbeitet werden.
- 4) **Unsicherheit** kommt durch die vielen Unbekannten hinsichtlich der adäquaten Mittel und Wege während des Innovationsprozesses zu Stande. Die Unsicherheit über Input- und Output-Zusammenhänge führt zu unklaren Zuständigkeiten der einzelnen Arbeitsschritte. Die Unsicherheit wird maßgeblich von der Komplexität und vom Neuigkeitsgrad beeinflusst.
- 5) Ein **Risiko** existiert, da keine Aussagen hinsichtlich des technischen und des ökonomischen Erfolges der Innovation getroffen werden können. Deshalb müssen Abbruchentscheidungen in den Innovationsprozess implementiert werden. Die Höhe des Risikos wird maßgeblich vom Neuigkeitsgrad der Innovation bestimmt.
- 6) Eine Innovation ist durch **Einmaligkeit** charakterisiert. Der Prozess wird zum ersten Mal durchgeführt, so dass keine Erfahrungen oder Referenzen bestehen. Daher müssen Innovationsprozesse eher generisch gestaltet sein, um diese für verschiedene Vorhaben anwenden zu können.⁵⁹²
- 7) Innovationsaktivitäten sind **wissensdominiert**. Wissen ist die geistige Kompetenz der sinnvollen Verwertung von Erkenntnissen oder das Erkennen von Kausalzusammenhängen zwischen Phänomenen.⁵⁹³ „Wissen ist der substantielle Produktionsfaktor im Innovationsprozess und zugleich auch großer Teil des Ergebnisses zumindest der Inventionstätigkeit (Generierung von Wissen).“⁵⁹⁴

⁵⁹¹ Hagenhoff (2008).

⁵⁹² vgl. Hagenhoff (2008).

⁵⁹³ vgl. Sanchez/Heene/Thomas (1996).

⁵⁹⁴ Hagenhoff (2008).

Die hier vorgestellten sieben Eigenschaften führen häufig zu unscharfen Definitionen des Innovationsziels, da Ziele oder zumindest Teilziele teilweise schnell veralten. Inhalte, Akzeptanz und Bewertungskriterien der Ziele verändern sich während des Innovationsprojektes und sind somit schlecht prognostizierbar.⁵⁹⁵

Um diesen Besonderheiten von Innovationsprozessen gerecht zu werden, wurden, aufbauend auf der Darstellungsform des Innovationsprozesses von Schumpeter, neue Darstellungsformen entwickelt. Die Teilschritte der frühen Phase des Innovationsprozesses beschreibt Schachtner (1999) im Detail. Er sieht die Ideensammlung sowie deren Bewertung und Auswahl als zentrale Aufgaben der frühen Phase. Daraufhin gilt es konkrete Produkt- und Projektdefinitionen zu erarbeiten.⁵⁹⁶ Abb. 5.1 zeigt die Schritte nach Schachtner der frühen Phase im Innovationsprozess.

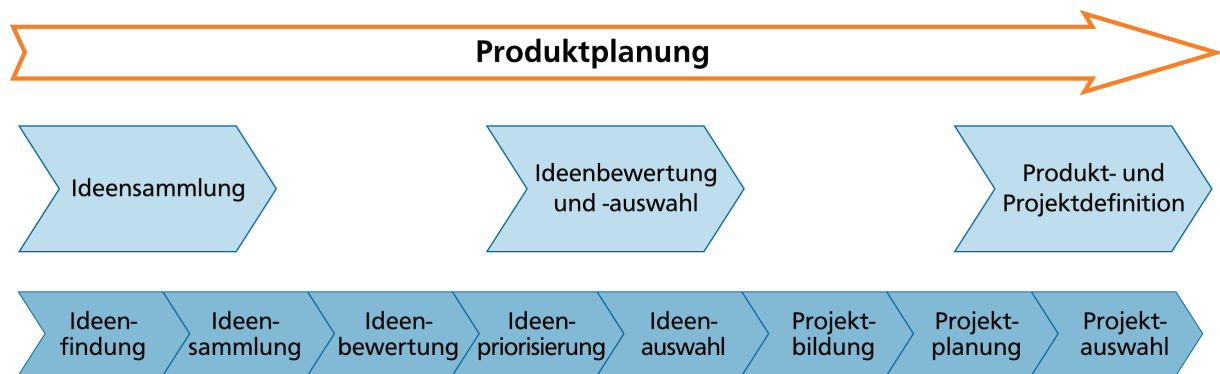


Abb. 5.1: Die Schritte des Produktplanungsprozesses nach Schachtner
Quelle: In Anlehnung an Schachtner (1999)

Verworn und Herstatt (2007) beschreiben den kompletten Innovationsprozess und teilen diesen in fünf Phasen ein. Abb. 5.2 zeigt die fünf Phasen des Innovationsprozesses nach Verworn und Herstatt und kennzeichnet die ersten beiden Phasen als die frühen Phasen des Innovationsprozesses.⁵⁹⁷ Die ersten beiden Phasen beschreiben Verworn und Herstatt als die frühen Phasen des Innovationsprozesses. Diese Phasen umfassen die Ideengenerierung und -bewertung (Phase I) sowie die Konzepterarbeitung und Produktplanung (Phase II). In der Phase III findet die Entwicklung gemäß den Vorgaben aus der Phase II statt. In der Phase IV wird die Entwicklung in Prototypen umgesetzt und getestet, bevor

⁵⁹⁵ vgl. Malik (1996).

⁵⁹⁶ vgl. Schachtner (1999).

⁵⁹⁷ vgl. Verworn/Herstatt (2007a).

in der Phase V die Produktion gestartet und die Entwicklung in den Markt eingeführt wird. Die Schritte des Produktplanungsprozesses nach Schachtner finden sich bei Verworn und Herstatt in deren ersten und zweiten Phase wieder.

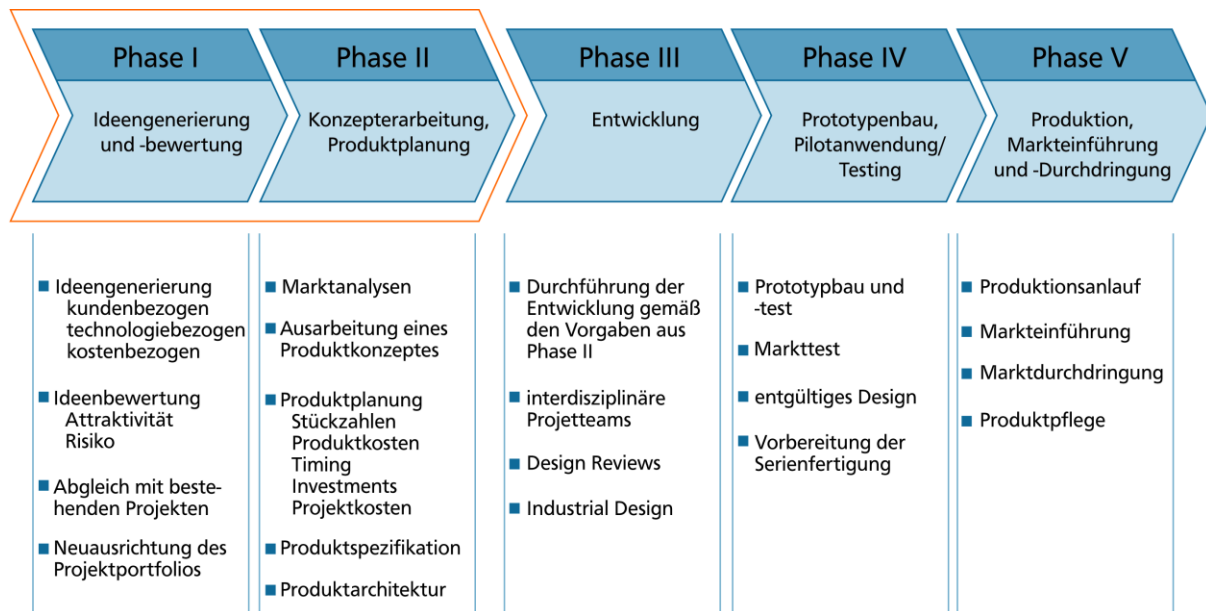


Abb. 5.2: Die fünf Phasen des Innovationsprozesses nach Verworn und Herstatt
Quelle: In Anlehnung an Verworn und Herstatt (2007)

Die Modelle von Verworn/Herstatt sowie von Schachtner gehen allerdings in ihrer Darstellungsform von linear ablaufenden Prozessen aus. Die in der Realität meist iterativ ablaufenden Prozesse eines Innovationsprozesses bilden diese Modelle somit nicht vollständig ab.

Die Darstellungsform des im Folgenden zu entwickelnden Innovationsprozesses wird deshalb so gewählt, dass der iterative Charakter eines solchen Innovationsprozesses deutlich wird. Darüber hinaus werden die Innovationsphasen den besonderen Begebenheiten des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik angepasst.

5.2. Die fünf Phasen des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik

Ziel dieses Abschnittes ist es, die erforderlichen Phasen des Innovationsprozesses in der druckbaren Elektronik zu bestimmen und darzustellen. Demzufolge werden die ersten beiden Phasen nach Verworn und Herstatt in einer Phase, der Produktplanungsphase zusammengefasst. Die Phase III wird als Produktentwicklungsphase übernommen. Die Phase IV erscheint für die druckbare Elektronik nicht unabhängig von den Schritten aus der Produktentwicklungsphase umsetzbar. Somit wird die Phase IV in die Produktentwicklungsphase integriert. Die Phase V wird in dieser Darstellung in drei Phasen unterteilt, da in der Produktion von druckbarer Elektronik der größten Entwicklungsbedarf zu sein scheint. Somit wird der Innovationsprozess in die folgenden fünf Phasen eingeteilt, die auf dem Weg von der Idee bis zur Produktion durchlaufen werden müssen:

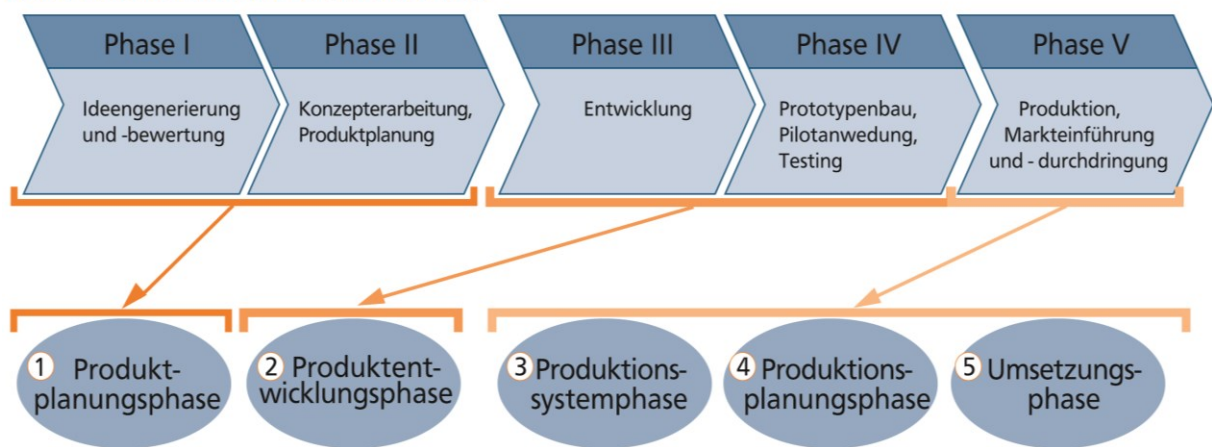
- 1) die Produktplanungsphase
- 2) die Produktentwicklungsphase
- 3) die Produktionssystemphase
- 4) die Produktionsplanungsphase
- 5) die Umsetzungsphase

Abb. 5.3 zeigt die fünf Phasen des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik, die den von Verworn und Herstatt ursprünglich definierten Innovationsprozess gegenüber gestellt sind. In der Abbildung sind oben Innovationsphasen nach Verworn und Herstatt dargestellt und unten die fünf Phasen des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik gegenübergestellt. Die Abbildung zeigt, dass die ersten beiden Phasen von Verworn und Herstatt für die druckbare Elektronik in der Produktplanungsphase zusammengefasst sind. Die zweite und dritte Phase werden für die druckbare Elektronik in der Produktentwicklungsphase zusammengefasst. Die fünfte Phase wird für die druckbare Elektronik in drei unterschiedliche Phasen aufgeteilt: Produktionssystemphase, Produktionsplanungsphase und Umsetzungsphase.

Diese fünf Phasen spiegeln die Besonderheiten der Produkte und Produktion der druckbaren Elektronik wieder. Die Untersuchungen aus den Kapiteln 3 und 4 betreffen vor allem die Produktentwicklungs- und die Produktionssystempha-

se. Im Folgenden wird der komplette Innovationsprozess mit allen fünf Phasen betrachtet. Der Innovationsprozess im Allgemeinen und vor allem auch in der druckbaren Elektronik ist deutlich komplexer, als es eine Prozessdarstellung wie in Abb. 5.3 darstellen kann. Darüber hinaus gibt die Prozessdarstellung keine Hinweise darauf, wie ein solcher Planungsprozess durchgeführt werden kann. Wie zuvor bei den Besonderheiten der Innovationen festgestellt, ist ein Innovationsprozess sehr komplex und darüber hinaus auch iterativ. Den iterativen Charakter von Innovationsprozessen haben unter anderem bereits Kline und Rosenberg (1986) sowie von Sandmeier u.a. (2004) beschrieben.⁵⁹⁸

ALLGEMEINER INNOVATIONSPROZESS



INNOVATIONSPROZESS DER DRUCKBAREN ELEKTRONIK

Abb. 5.3: Vergleich des allgemeinen Innovationsprozesses mit dem Innovationsprozess der druckbaren Elektronik

Zu dem Thema Iteration im Entwicklungsprozess schreiben Pahl u.a.:

„Bei Neuentwicklungen handelt es sich dabei um einen Iterationsvorgang, bei dem man sich der Lösung schrittweise nähert, bis das Ergebnis befriedigend erscheint. (...) Solche Iterationsschleifen sind fast immer erforderlich und treten innerhalb der Arbeitsschritte und zwischen ihnen ständig auf. Der Grund liegt darin, dass häufig die Zusammenhänge komplex sind und die angestrebte Lösung daher nicht in einem Schritt gewonnen werden kann oder dass erst aus einem anderen, eigentlich nachfolgenden Arbeitsschritt Erkenntnisse für den vorhergehenden gewonnen werden müssen.“⁵⁹⁹

⁵⁹⁸ vgl. Kline/Rosenberg (1986); Sandmeier u. a. (2004); Asdonk/Bredeweg/Kowol (1991); Pérez-Bustamante (1999).

⁵⁹⁹ Pahl u. a. (2007).

Diesen iterativen Charakter von Innovationsprozessen kann mit einer Prozessdarstellung nicht wiedergegeben werden. Um diesen Besonderheiten gerecht zu werden, wird die Darstellungsform eines Ablaufplans⁶⁰⁰ gewählt. Dieser hat neben der übersichtlichen Darstellung den Vorteil, dass er die Reihenfolge der Schritte vorgibt und auch Feedbackschleifen (Iterationsschleifen) zulässt.

Abb. 5.4 zeigt die fünf Phasen des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik. In den folgenden Abschnitten werden die fünf Phasen im Detail erörtert. In dieser Abbildung sind die jeweiligen Phasen grau hinterlegt. Jede der fünf Phasen endet mit einem (Zwischen-) Ergebnis, welches in einer orangenen Raute dargestellt ist. Die orangenen Rauten stellen jeweils auch eine Chance zur Überprüfung der Ergebnisse und des Projekts dar. Um dies zu verdeutlichen, wurden Feedbackschleifen an diesen Zwischenergebnissen vorgesehen, die das Abgleichen mit den Vorgaben und dem Businessplan ermöglichen. Die wichtigsten Arbeitsschritte sind in blauen Rechtecken dargestellt. Eine solche Übersicht erfordert eine Konzentration auf die wesentlichen Bestandteile, so dass viele kleinere Arbeitsschritte hier nicht erwähnt werden können.

⁶⁰⁰ Ein Ablaufplan kommt in dem Projektmanagement und zum Einsatz. Ein Ablaufplan ist die Dokumentation des geplanten, sachlichen und zeitlichen Ablaufes des Projektes.

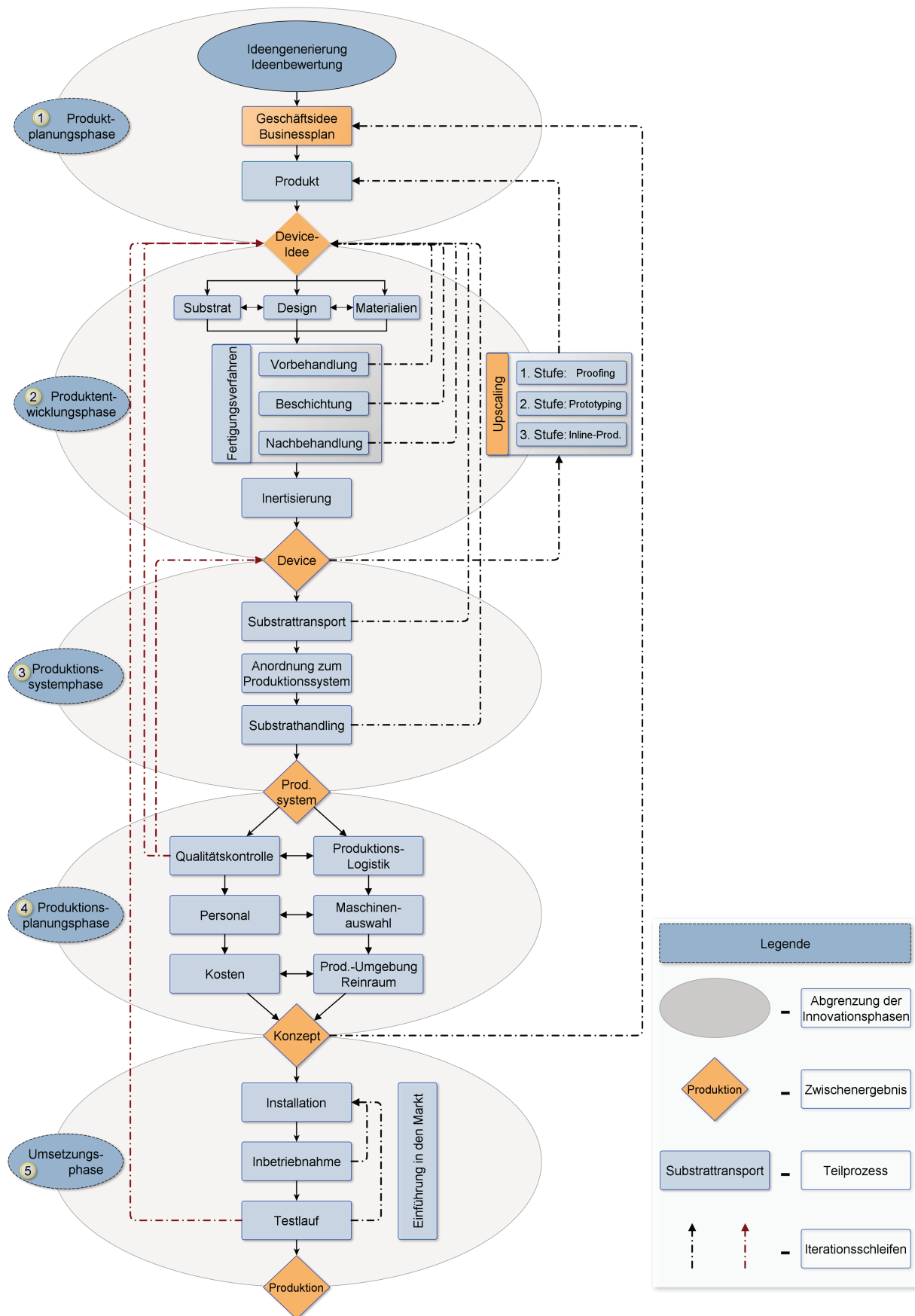


Abb. 5.4: Die fünf Phasen des Innovationsprozesses von druckbarer Elektronik

5.2.1. 1. Phase: Produktplanung

Die Aufgaben der Produktplanung sind nach Schachtner vor allem die Ideenfindung, Ideensammlung, Ideenbewertung, Ideenpriorisierung, Ideenauswahl, Projektbildung, Projektplanung und zum Schluss die Projektauswahl.⁶⁰¹ Die Produktplanung eines Innovationsprozesses ist auf Grund des frühen Status mit Unsicherheiten in den Bereichen Markt, Technologie und Organisation verbunden. Dabei stellen sich häufig Fragen wie: Was ist der Zielmarkt? Wie groß ist der Markt? Welche Bedürfnisse haben die Kunden? Welchen Preis sind die Kunden bereit zu zahlen? Welches sind die technischen Anforderungen an das Produkt? Ist die Idee technisch umsetzbar? Welche Produktionsanlagen werden benötigt?⁶⁰² Die Unsicherheiten sind in der Matrix in Abb. 5.5 dargestellt.

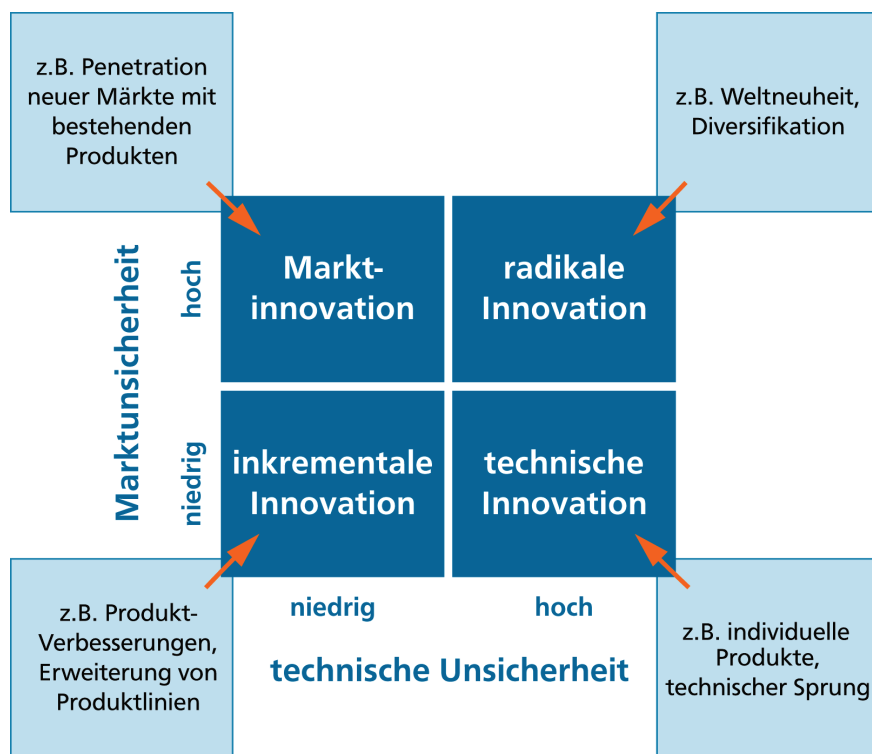


Abb. 5.5: Unsicherheitsmatrix für die frühen Phasen des Innovationsprozesses
Quelle: In Anlehnung an Verworn und Herstatt (2007b)

Um die Effizienz von Innovationsprozessen zu erhöhen und um die vielen Schritte übersichtlich zu gestalten, wurden unterschiedliche Methoden entwickelt.⁶⁰³ Eine davon ist der Stage-Gate-Prozess. Dieser wurde zur Optimierung von Innovationsprozessen entwickelt und passt sehr gut zu dem vorgestellten

⁶⁰¹ vgl. Schachtner (1999).

⁶⁰² vgl. Verworn/Herstatt (2007b).

⁶⁰³ Für eine tiefere Betrachtung unterschiedlicher Modelle des Innovationsprozesses vgl. Verworn/Herstatt (2000).

iterativen Vorgehen des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik. Der Vorteil des Stage-Gate-Prozesses liegt darin, dass die Gates die Aufmerksamkeit auf die aktuell zu bearbeitenden Prozessschritte lenkt und so keine Prozessschritte ausgelassen werden.⁶⁰⁴

In Abb. 5.6 ist ein solcher Stage-Gate-Prozess beispielhaft dargestellt. Hierbei wird der Innovationsprozess in sequenziell ablaufende Schritte („stages“) aufgeteilt. Nach jedem Schritt wird an einem „gate“ über die Fortführung des Projektes entschieden („go oder no go“). Dafür wird überprüft, ob die notwendigen Leistungen erbracht wurden und ob alles bereit für den nächsten Schritt des Innovationsprozesses ist.⁶⁰⁵

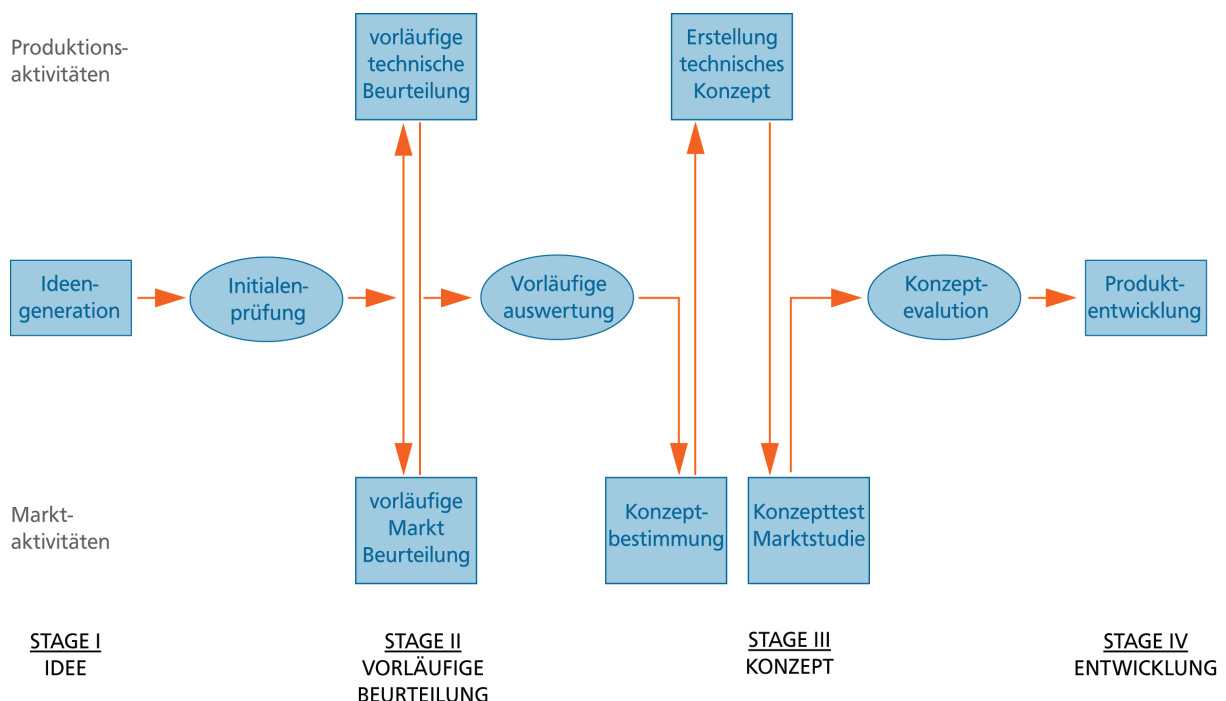


Abb. 5.6: Stage-Gate-Prozess für die frühen Phasen
Quelle: In Anlehnung an Cooper (1988)

Dieser Stage-Gate-Prozess wurde in den Innovationsprozessen der druckbaren Elektronik integriert. Wie in Abb. 5.4 dargestellt, ist das (Zwischen-) Ergebnis jeder Phase in einer Raute dargestellt. Jede dieser Raute stellt ein Gate in dem Innovationsprozessen dar, da in diesen Stellen überprüft werden muss, ob die Ziele erreicht werden konnten und wie gegebenenfalls weiter vorgegangen

⁶⁰⁴ vgl. Kleinschmidt/Geschka/Cooper (2012).

⁶⁰⁵ vgl. Cooper (1988).

wird.⁶⁰⁶ Um dies zu verdeutlichen, wurden Feedbackschleifen an diesen Zwischenergebnissen angebracht. Diese mahnen an, nach jeder Phase die Zwischenergebnisse mit den Vorgaben aus dem Businessplan abzugleichen.

Zu Beginn der Produktplanungsphase steht die Ideengenerierung. In dieser Phase geht es darum Produktideen zu entwickeln, welche Halbzeuge der druckbaren Elektronik benötigt. Als Beispiele seien die in Kapitel 3 erwähnten OLED-Lampe oder OPV-Handyladegerät genannt. Wie in Abb. 5.7 dargestellt, geht es darum aus den vielen Möglichkeiten der druckbaren Elektronik sich auf ein Produkt festzulegen, und für dieses eine Geschäftsidee zu entwickeln. Das Feld der druckbaren Elektronik ist neu und zudem sehr interdisziplinär. Dadurch ist es kaum vorstellbar, dass ohne Kenntnisse über die Technologie der möglichen Devices, die Materialien, die Fertigungstechnologien und die adressierten Märkte eine Produktidee entwickelt und in einen erfolgsversprechenden Businessplan umgesetzt werden kann. Solange diese Technologie neu ist und keine genormten Halbzeuge zur Verfügung stehen, ist in dieser Phase die Zusammenarbeit vieler Experten notwendig. Aus heutiger Sicht sind das Wissen und die Erfahrung von Industriedesignern, Physikern, Chemikern, Ingenieuren und Betriebswirten notwendig.⁶⁰⁷

Für das Verständnis dieser Arbeit ist es ausreichend, die Produktplanungsphase nur kurz zu beschreiben. Das Vorgehen und die Instrumente aus der Literatur zur Ideengenerierung und zur Ideenbewertung können auch für die druckbare Elektronik angewendet werden und bedürfen keiner Anpassung.⁶⁰⁸ Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in dem Aufzeigen eines Weges von einer funktionierenden Idee hin zu einer optimalen Produktion.

Steht nun eine Geschäftsidee fest, welche Produkte der druckbaren Elektronik benötigt, gilt es daraus einen Businessplan zu gestalten. Dieser sehr aufwendige Schritt ist notwendig, um die Wirtschaftlichkeit der Geschäftsidee zu überprüfen und um notwendige Geldgeber von der Idee zu überzeugen. Dieser Schritt soll hier nicht weiter vertieft werden, deshalb sei an dieser Stelle auf die man-

⁶⁰⁶ In der konkreten Anwendung des Innovationsprozesses muss überprüft werden, ob nicht noch weitere Gates definiert werden müssen, als die hier aufgeführten.

⁶⁰⁷ Die Chancen von Kooperationen im Innovationsprozess werden in Kapitel 6.2 im Detail analysiert.

⁶⁰⁸ Weitere Informationen über die frühen Phasen des Innovationsprozesses sind unter anderem bei Verworn/Herstatt (2007b); Schachtner (1999). zu finden.

nigfaltige Literatur hingewiesen.⁶⁰⁹ Der Businessplan kann an dieser Stelle nicht als abgeschlossen betrachtet werden, da noch wichtige Informationen über das Produkt und den Markt fehlen. Dieser Prozess sollte als iteratives Vorgehen verstanden werden, wie die Feedbackschleifen in Abb. 5.2 zeigen.

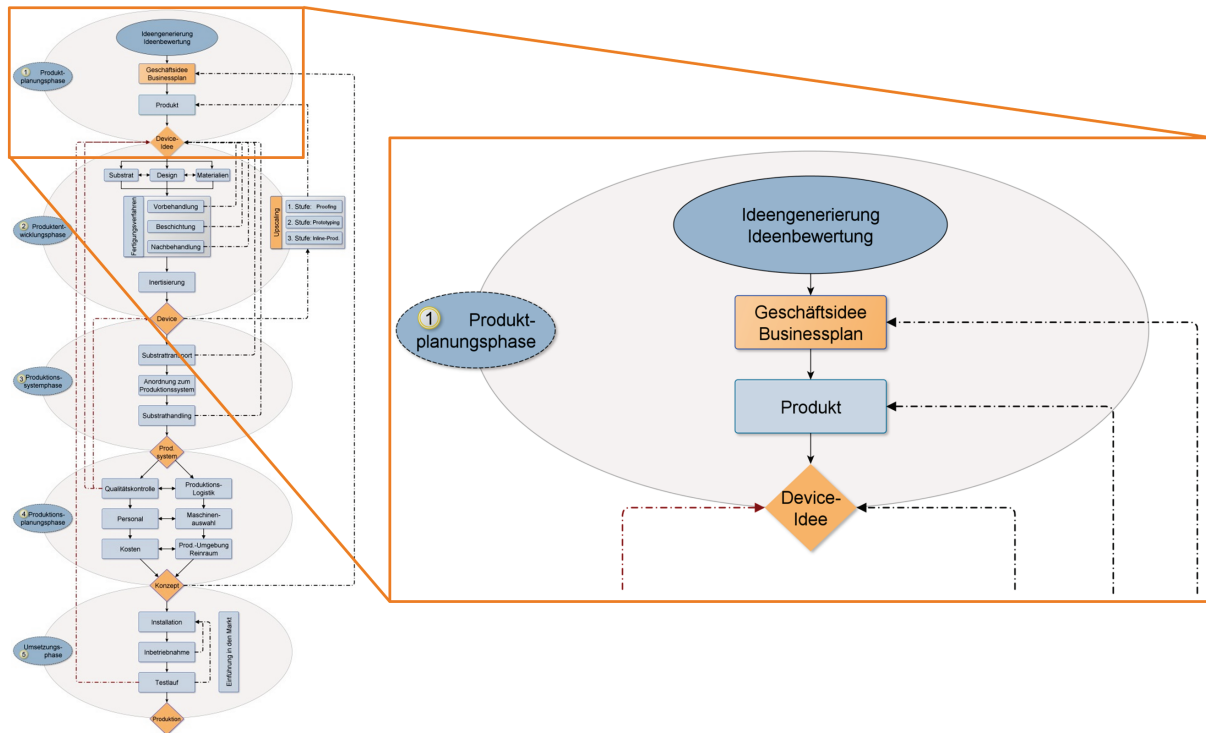


Abb. 5.7: Die erste Phase des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik ist die Produktplanungsphase

Für die wichtigen Eckdaten⁶¹⁰ werden bereits in der Produktplanungsphase erste Schätzungen durchgeführt, die im Zuge der Konkretisierung im Laufe des Innovationsprozesses immer genauer geschätzt werden können. Aus Produktionssicht sollten aus der ersten Version des Businessplans hervorgehen, welches Produkt produziert werden soll und welches Device der druckbaren Elektronik dafür notwendig ist. Daraus sollten erste Spezifikationen des Devices, eine Abschätzung für die zu produzierende Stückzahl sowie erste Preisabschätzungen abgeleitet werden. Mit der ersten Beschreibung eines Devices kann die zweite Phase des Innovationsprozesses, die Produktentwicklungsphase, gestartet werden.

⁶⁰⁹ Literatur zum Erstellen eines Businessplans: vgl. Wittmann/Reuter/Magerl (2007); Herzberg (2010); Ripsas/Zumholz/Kolata (2008).

⁶¹⁰ Wichtige Eckdaten aus Produkt- bzw. Produktionssicht sind beispielsweise Kosten sowie Qualität des Produkts.

5.2.2. 2. Phase: Produktentwicklung

Die Aufgabe der Produktentwicklung ist das Finden von Lösungen für technische Probleme und stützt sich dabei unter anderem „auf natur- und ingenieurwissenschaftliche Erkenntnisse und berücksichtigt stoffliche, technologische und wirtschaftliche Bedingungen sowie gesetzliche, umwelt- und menschenbezogene Einschränkungen“.⁶¹¹ Eine Übersicht über die vielen Methoden und Leitfäden für die Produktentwicklung geben Pahl u.a. (2007). Ein allgemein anerkanntes und weitverbreitetes Vorgehen ist beispielsweise in den VDI-Richtlinien 2222 und 2221 definiert.⁶¹² Abb. 5.8 zeigt das Vorgehen in der Produktentwicklung nach dem systemtechnischen Ansatz.

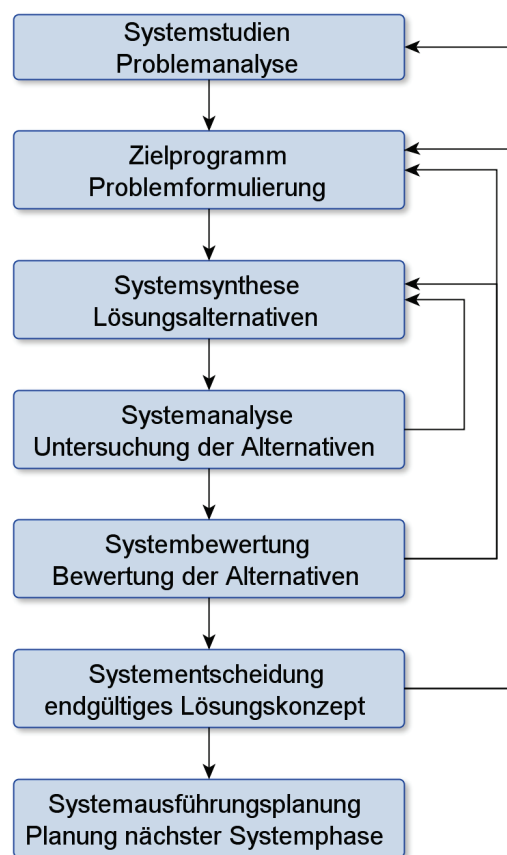


Abb. 5.8: Vorgehensschritte in der Produktentwicklung nach dem systemtechnischen Ansatz
Quelle: In Anlehnung an Pahl u.a. (2007)

Dieses „beruht auf der allgemeinen Erkenntnis, dass komplexe Problemstellungen zweckmäßig in bestimmten Arbeitsschritten gelöst werden“ können.⁶¹³ Die

⁶¹¹ Pahl u. a. (2007).

⁶¹² vgl. VDI Verlag (1996a); VDI Verlag (1993).

⁶¹³ Pahl u. a. (2007).

Abbildung macht den komplexen und mehrstufigen Ablauf einer Produktentwicklung deutlich. Der erste Schritt ist die Problemanalyse. Ziel ist eine klare Formulierung der zu lösenden Probleme. In einem zweiten Schritt wird die Zielsetzung für das zu schaffende System formal festgelegt, die für eine spätere Bewertung von Lösungen sehr wichtig sind. Im dritten Schritt werden die Lösungsvarianten entwickelt, die daraufhin im vierten Schritt untersucht und im fünften Schritt mit der Zielsetzung verglichen werden. “Es wird überprüft, welche Lösung die Anforderungen der Aufgabenstellung am besten erfüllt.”⁶¹⁴ Durch die Bewertung kann dann im sechsten Schritt die optimale Lösung gefunden werden.

Übertragen auf die druckbare Elektronik, hat die Produktentwicklung das Ziel, ein funktionierendes und herstellbares Device zu entwickeln, welches den in der ersten Phase definierten Anforderungen entspricht. Hierfür werden mehrere Lösungsmöglichkeiten erarbeitet, von denen die Lösung ausgewählt wird, welche die Anforderungen erfüllt und am günstigsten zu fertigen ist. Ergebnis der zweiten Phase muss ein Device sein, welches zum einen den Anforderungen aus der ersten Phase möglichst gut entspricht, und zum anderen reproduzierbar hergestellt werden kann. In der ersten Iteration genügt es, dieses Device in Einzelstücken reproduzierbar herzustellen.

Die Anforderungen an das Device müssen zunächst in technische Daten übersetzt werden. Hierfür ist es notwendig, aus den Anforderungen die Spezifikationen für das Device-Layout, das Substrat und die einzusetzenden Funktionsmaterialien abzuleiten. In Abb. 5.9 ist die in Kapitel 3.2 hergeleitete gegenseitige Abhängigkeit dieser drei Größen dargestellt. Nach dem Multi-Level-Ansatz sind diese drei Kriterien voneinander abhängig, so dass eine Veränderung an einer Stelle immer auch Änderungen an anderer Stelle hervorruft. Im nächsten Schritt müssen das Substrat und die Funktionsmaterialien nach dem Device-Layout zu einem funktionierenden Device kombiniert werden. Hierfür müssen zunächst die Materialien auf das Substrat zu funktionierenden Schichten aufgebracht werden, um so das ausgewählte Design nachzubauen.

Als erster und wichtigster Schritt des Entwicklungsprozesses müssen zunächst geeignete Fertigungsverfahren gefunden werden, um die ausgewählten Mate-

⁶¹⁴ Pahl u. a. (2007).

rialien zu Schichten zu verarbeiten. Dafür sind neben den eigentlichen Beschichtungsprozessen auch ggf. Vorbehandlungsschritte und Nachbehandlungsschritte notwendig. In Kapitel 4.2.1 wurde bereits beschrieben, wie ein solcher Auswahlprozess für Beschichtungsverfahren durchgeführt wird.

Für diesen Auswahlprozess sind Iterationsschleifen notwendig, um ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erzielen. Die vielen aufeinander abzustimmenden Parameter und die nur zum Teil erforschten Zusammenhänge machen diese Iterationen notwendig. Deshalb sind in Abb. 5.9 von jedem Teilprozess der Fertigungsverfahren Rückkopplungen zu dem zuvor definierten Device vermerkt. Um diesen sehr aufwendigen Schritt möglichst effizient zu gestalten, hat sich das in Kapitel 4.2.1 beschriebene dreistufige Prinzip bewährt. Das dreistufige Prinzip lässt sich auch als Stage-Gate-Prozess des Entwicklungsprozesses der druckbaren Elektronik bezeichnen. Erst, wenn bestimmte Kriterien erfüllt sind, kann die nächste Stufe des Upscalings begonnen werden. Diesem Prinzip folgend, werden also die ersten Versuche zunächst alle in der ersten Stufe durchgeführt. Zum einen können mit den eingesetzten kleinen Bedruckbarkeitsgeräten die Material- und Betriebskosten reduziert werden, und zum anderen ermöglichen diese Maschinen ein schnelles Abarbeiten verschiedener Versuchsreihen. Ziel der ersten Stufe ist es, dass alle Materialien auf der vorhergesehenen Oberfläche die geplanten Schichten bilden. Ist das Ziel erreicht, kann das erste Gate passiert werden und die Versuche auf den Labordruckmaschinen der zweiten Stufe durchgeführt werden.

Diese Maschinen sind deutlich exakter und haben keine Einschränkung in der Druckformauswahl. Somit können mit Hilfe der Maschinen der zweiten Stufe aus den Einzelschichten funktionierende Devices entwickelt werden. In weiteren Iterationsschleifen wird die Leistungsfähigkeit des Devices optimiert. Ziel der zweiten Stufe sind optimierte Devices, die den zuvor gestellten Anforderungen möglichst nahe kommen. In dieser Phase werden nach wie vor nur Einzel Exemplare prozessiert. Konnten zufriedenstellende Devices realisiert werden, kann das zweite Gate passiert werden.

Anschließend wird der erste Prototyp in der dritten Stufe auf Fertigbarkeit im industriellen Maßstab getestet und optimiert. Hierfür sind Maschinen notwendig, die zumindest seriennah sind. Dazu zählt neben der Druckqualität vor allem der kontinuierliche Betrieb. Diese Maschinen sind noch nicht auf die Pro-

duktion eines bestimmten Produkts optimiert, aber lassen wichtige Rückschlüsse auf die Produktion zu. Kann die Fertigbarkeit im industriellen Maßstab gezeigt werden, kann das dritte Gate passiert werden.

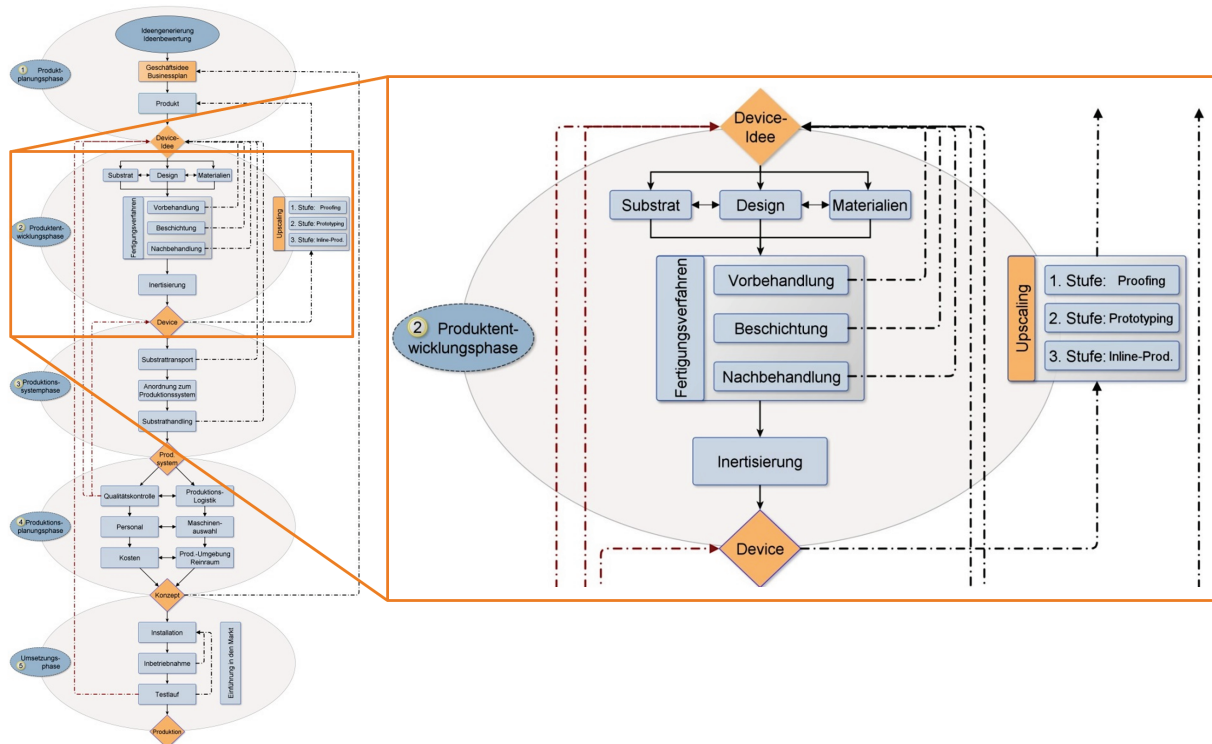


Abb. 5.9: Die zweite Phase des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik ist die Produktentwicklung

Während den Iterationsschleifen des Upscalingprozesses muss die Entscheidung getroffen werden, ob bestimmte Prozesse unter inerten Bedingungen stattfinden müssen, um die in der Produktplanungs-Phase festgelegten Spezifikationen erfüllen zu können.

Als Ergebnis der zweiten Phase steht ein Device, welches die durch die Iterationsschleifen evtl. angepassten Spezifikationen erfüllt und reproduzierbar herstellbar ist, welches mit Kleinserien auf der dritten Stufe gezeigt wurde.

5.2.3. 3. Phase: Produktionssystemplanung

Das Ziel der Produktionssystemplanung ist aus den Einzelprozessen der zweiten Phase ein produktives und effizientes Produktionssystem zu gestalten. Es gilt ein optimiertes Produktionssystem auszuarbeiten, welches zum einen mindestens die im Businessplan geschätzte Menge der Devices herstellen kann, und zum anderen diese wirtschaftlich herstellen kann. Zu diesem Zeitpunkt steht

bereits fest, welche Prozesse in welcher Reihenfolge durchgeführt werden müssen. Die Reihenfolge wird von dem in der zweiten Phase ausgearbeiteten Design vorgegeben. Wie in Abb. 5.10 dargestellt, müssen hierfür der Substrattransport, die Anordnung zu einem Produktionssystem und das Substrathandling optimiert werden. In Abb. 5.2 ist dargestellt, dass der Substrattransport und das Substrathandling wieder Einflüsse auf andere Größen hat, so dass von diesen beiden Teilprozessen Iterationsschleifen zurück zum Start der zweiten Phase verlaufen.

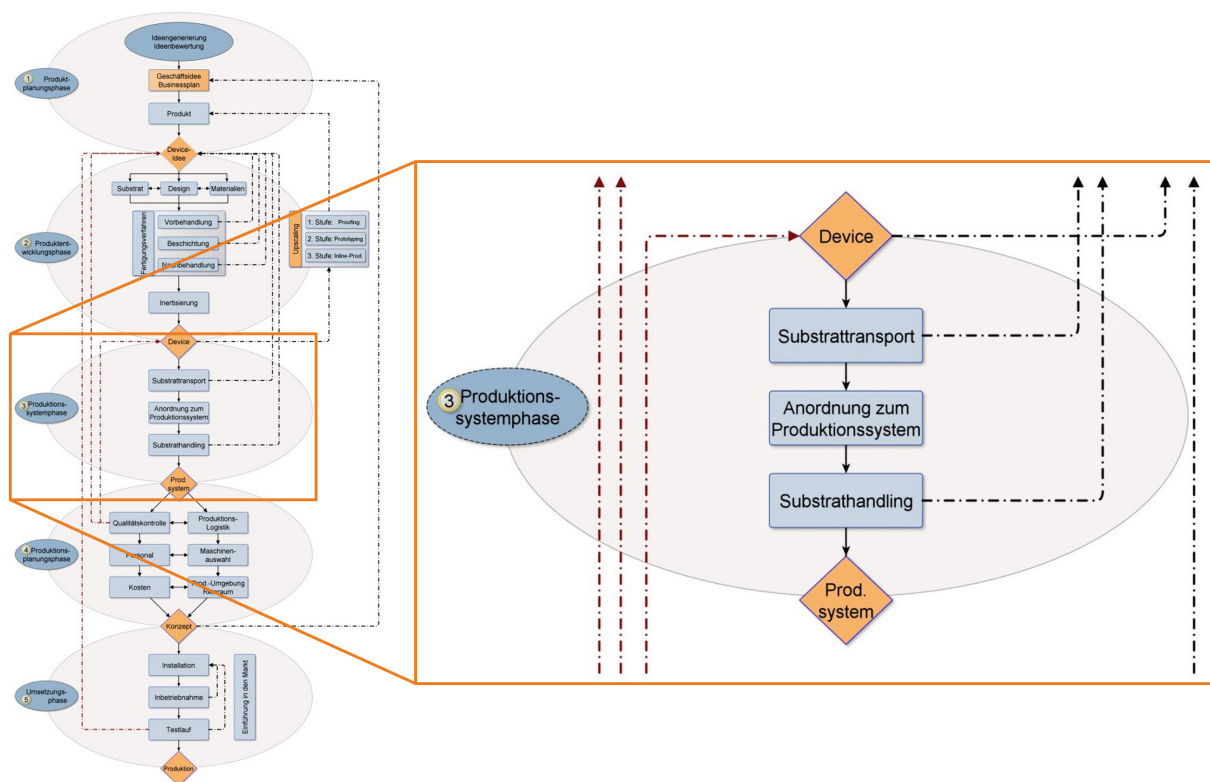


Abb. 5.10 Die dritte Phase des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik ist die Produktionssystemphase

Zunächst muss der Substrattransport gemäß den Spezifikationen angepasst werden. Wie in Kapitel 4.3 im Detail diskutiert, stehen aus heutiger Sicht vier Methoden des Substrattransports zur Verfügung: Roll-to-Roll, Sheet-to-Sheet, Roll-to-Sheet und Sheets-on-Shuttle. Nun gilt es, die passende Methode gemäß den Auswahlkriterien aus Kapitel 4.3.3 auszuwählen und an das Produktionssystem und die verwendeten Prozesse anzupassen. Die Entscheidung über den Substrattransport hat große Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Produktionssystems. Darüber hinaus birgt diese Entscheidung auch große Risiken, da die Substrattransportmethode eines Systems nicht mehr änderbar ist. Die Entscheidung kann nur mit erheblichem Aufwand, oft nur mit dem Neubau der

Anlage, korrigiert werden. Die Folgekosten eines Entwicklungsfehlers wären in diesem Falle besonders hoch und kommen einer Neukonstruktion gleich. Andere Entscheidungen wie beispielsweise der Einsatz der Fertigungsverfahren sind deutlich leichter zu korrigieren. So ist es mit begrenztem Aufwand möglich, auf einer bestehenden Produktionsanlage einzelne Beschichtungsverfahren auszutauschen.⁶¹⁵

Von dem Substrattransport ist erneut eine Iterationsschleife zu dem Device notwendig. So müssen die Spezifikationen des Devices, im speziellen des Substrats, und die Prozesse sowie die herzustellende Menge mit der Substrattransportmethode abgeglichen werden. Steht die Substrattransportmethode fest, müssen alle Einzelprozesse unter Berücksichtigung der Substrattransportmethode und den ökonomischen Randbedingungen zu einem Produktionssystem angeordnet werden. Hierbei geht es darum, die Einzelstation zu einem möglichst effizienten Gesamtsystem zusammenzufügen. Die Reihenfolge der Bearbeitungsstationen ist durch die Reihenfolge der Schichten, dem Device-Layout folgend, vorgegeben. Hierfür werden zunächst die Bearbeitungszeiten inklusive Transport- und Rüstzeiten einzelner Stationen miteinander verglichen, und so Engpässe identifiziert.⁶¹⁶ Diese müssen durch geeignete Maßnahmen wie Optimierung oder Parallelisierung der Bearbeitungsstation entschärft werden. In Kapitel 4.4 wurde unter Verwendung von Rollensubstraten gezeigt, wie ein solches Produktionssystem optimiert werden kann.

Das optimierte Produktionssystem muss nun noch mit dem Substrathandling ergänzt werden. Damit sind alle Substrat- und Materialbewegungen zwischen den Bearbeitungsstation zusammengefasst. Das Substrathandling ist dabei Teil der Produktionslogistik. Da im Zusammenhang von druckbarer Elektronik immer von Massenfertigung gesprochen wird, fallen dementsprechend viele Zwischenprodukte an. Die Masse an Zwischenprodukten muss zwischen einzelnen Bearbeitungsstation transportiert und gegebenenfalls gelagert werden. In Kapitel 4.4.4 wird das Thema Substrathandling erörtert. Dabei müssen Fragen geklärt werden, wie die schweren Substratrollen oder Substratstapel mit einem Gewicht von bis zu einer Tonne transportiert werden, ohne dass die bereits ap-

⁶¹⁵ Wie in Kapitel 4.2.2 dargestellt, gilt das in erster Linie für Nicht-Vakuumverfahren. Der Aufwand um Vakuumverfahren mit Nicht-Vakuumverfahren zu ersetzen oder andersherum ist aus heutiger Sicht schwer abzuschätzen. Vermutlich ist der Aufwand größer als bei nur Nicht-Vakuumverfahren.

⁶¹⁶ vgl. Kapitel 4.4.

plizierten Schichten beschädigt werden. Auch das Aufrollen oder Stapeln der Substrate bevor eine Schutzschicht aufgebracht wurde, muss im Detail untersucht werden, da die Substrate auf den Funktionsschichten reiben und diese somit beschädigt werden können.

Als Ergebnis der dritten Phase steht ein optimiertes Produktionssystem, welches das zuvor definierte Device in ausreichender Menge und Qualität zu minimalen Kosten herstellen kann.

5.2.4. 4. Phase: Produktionsplanung

Das Ziel der Produktionsplanung ist das zuvor ausgearbeitete Produktionssystem in eine funktionierende und vollständig durchgeplante Produktion zu überführen. Das Ergebnis der vierten Phase ist ein Konzept für die Produktion des Devices, welches direkt umgesetzt werden kann. Dieses Konzept hat eine Iterationsschleife zurück zu dem Businessplan. Abb. 5.11 zeigt die notwendigen Schritte von dem Produktionssystem hin zu einem Produktionskonzept. Hierfür müssen folgende Aspekte im Detail ausgearbeitet werden:

Produktionslogistik, Maschinenauswahl, Produktionsumgebung sowie Qualitätskontrolle, Personal und Kosten. Die Reihenfolge dieser Aspekte ist in Abb. 5.11 dargestellt, wobei die Aspekte sehr stark voneinander abhängig sind. Die Abhängigkeiten sind in Abb. 5.11 angedeutet.⁶¹⁷

Die **Produktionslogistik** hat eine große Bedeutung im Unternehmen, da ohne Logistik keine wertschöpfende Produktion möglich wäre.⁶¹⁸ Die Produktionslogistik bietet die Möglichkeit Kostensenkungspotentiale sowie weitere „Performanceindikatoren“⁶¹⁹ zu beeinflussen und somit die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu erhöhen.“⁶²⁰ So umfasst der Teilbereich Produktionslogistik die Planung, Steuerung und Überwachung der innerbetrieblichen Transport- und Lagerprozesse und hat Schnittstellen zur Beschaffungs- und Distributions-

⁶¹⁷ In Abb. 5.11 ist ein Teil der Abhängigkeit mit Pfeilen dargestellt. Das Darstellen aller Abhängigkeiten führt zu einer unübersichtlichen Abbildung.

⁶¹⁸ vgl. Günthner (2006).

⁶¹⁹ Beispiele für solche Performanceindikatoren sind: Optimierung von Kosten-, Qualitäts- und Zeitaspekten sowie von der Kundenorientierung. Vgl. Tentrop (2011).

⁶²⁰ Tentrop (2011).

logistik.⁶²¹ Die Produktionslogistik muss dafür Sorge tragen, dass der Produktionsfluss nicht unterbrochen wird. In dem Fall einer Produktion von druckbarer Elektronik wird eine Bevorratung von den notwendigen Substraten und Funktionsfluiden benötigt. Diese müssen im festgelegten Takt an die Anlage transportiert werden.⁶²² Je nach Produktionssystem müssen evtl. Zwischenprodukte zwischengelagert werden. Somit gibt es eine Schnittstelle zum Substrathandling aus der Produktionssystemphase. Wurden die Substrate in dem Produktionssystem fertig prozessiert, müssen diese von der Anlage abtransportiert und zwischengelagert werden. Daher müssen mehrere Lager verwaltet werden und die Materialien zum Produktionssystem hin und wieder abtransportiert werden.

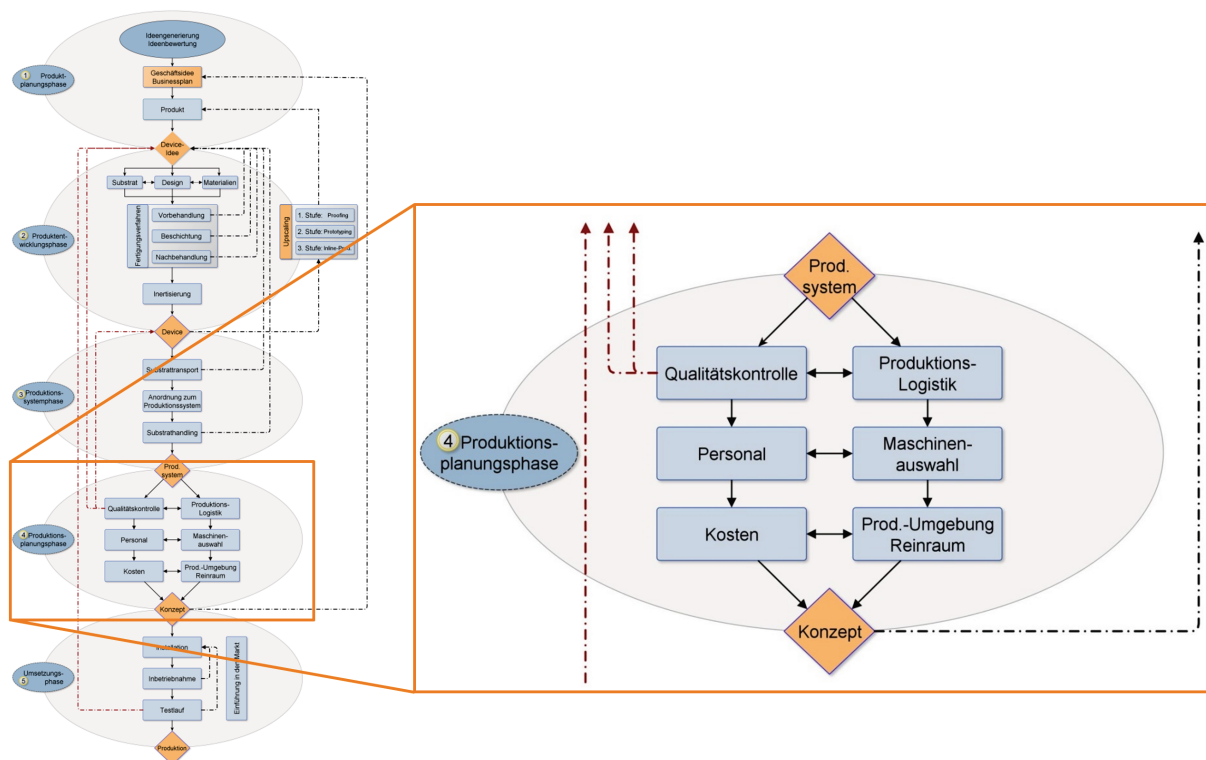


Abb. 5.11: Die vierte Phase des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik ist die Produktionsplanung

Des Weiteren muss in der Produktionsplanung die **Maschinenauswahl** für das Produktionssystem getroffen werden. Die Voruntersuchungen aus der Produktentwicklungs- und Produktionssystemphase haben gezeigt, welche Fertigungsverfahren und welche Substrattransportmethode eingesetzt werden. Diese Kriterien bestimmen, neben anderen Kriterien wie die Produktionsmenge oder die

⁶²¹ vgl. Grün/Kummer/Jammerneegg (2009); vgl. Günther/Tempelmeier (2012b).; vgl. Günther u. a. (2012).

⁶²² Eine Sonderform eines solchen zirkulierenden Transportsystems ist der Milkrun, „bei dem Transport, Bereitstellung und Entsorgung von Material verbrauchsgesteuert auf einer Route erfolgt.“ Brungs (2012).

Notwendigkeit einer Inertisierung, in erheblichen Maßen die Produktionsanlagen. Aus heutiger Sicht gibt es noch keine Produktionsanlagen, die als Standardprodukte zur Verfügung stehen. Daher müssen Produktionsanlagen speziell für den Einzelfall entwickelt und gebaut werden. Die hier beschriebenen Kriterien stellen dabei das Grundgerüst eines Lastenheftes für mögliche Maschinenlieferanten dar. Das Lastenheft muss dabei in jedem Einzelfall weiter individualisiert werden.

Im nächsten Schritt muss geklärt werden, welche **Produktionsumgebung** notwendig ist. So muss beispielsweise die Frage gestellt werden, ob ein **Reinraum** erforderlich ist. Unter Umständen kann die Notwendigkeit eines Reinraumes bereits deutlich früher feststehen, aber erst mit dem Konzept zur Produktionslogistik und den notwendigen Lagerplätzen kann abschließend der Reinraum dimensioniert werden. Zunächst muss geklärt werden, wie viel Schmutz auf den betroffenen Oberflächen toleriert werden kann. Da ein Reinraum hohe Investitions- und Betriebskosten verursacht⁶²³, sollte dieser aus Kostensicht entweder vermieden oder so klein wie möglich ausgelegt werden. Werden beispielsweise alle Substrate einem Reinigungsschritt unterzogen, müssen diese nicht unbedingt in einem Reinraum gelagert werden. Außerdem müssen unter Umständen nur sensible Bereiche in einem Reinraum sehr sauber sein. Für weitere Informationen bezüglich Reinraumplanung wird auf weitere Literatur verwiesen.⁶²⁴

Eine **Qualitätssicherung** in der Produktion von druckbarer Elektronik ist unerlässlich. Die Funktion der produzierten Devices muss überprüft werden, damit zum einen keine defekten Produkte an die Kunden geliefert werden. Zum anderen wirkt sich hoher Ausschuss an Zwischen- oder Fertigerzeugnissen negativ auf die Wirtschaftlichkeit aus. So sind Qualitätskontrollen nach jedem Arbeitsschritt denkbar, um die Makulaturkosten so gering wie möglich zu halten. Somit ist die fertigungsbegleitende und massenfertigungstaugliche Qualitätssicherung ein wichtiger Bestandteil einer wirtschaftlichen Massenfertigung der druckbaren Elektronik. Zu prüfen sind zum einen die Funktion, und zum anderen auch die Lebensdauer der produzierten Devices. Daher gilt es die Erfahrungen und Methoden aus der Qualitätssicherung der Produktion anderer Erzeug-

⁶²³ vgl. Kapitel 6.1

⁶²⁴ vgl. Gail/Gommel/Hortig (2012).; vgl. Ernst/Schmauz/Kreck (2012); Detzer (2012).

nisse auf die druckbare Elektronik zu übertragen.⁶²⁵ Aus der Produktion der siliziumbasierten Elektronik kann gefolgert werden, dass bereits auf der Entwurfsseite Anpassung am Design notwendig sind, um Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit überprüfen zu können. Die Optimierung dieser Teststrukturen im Device-Design bedarf eines iterativen Vorgehens, was in Abb. 5.2 dargestellt ist. Die Feedbackschleifen wurden mit roten Pfeilen gekennzeichnet, um deutlich zu machen, dass Qualitätsmanagement in allen Bereichen des Innovationsprozesses eine wichtige Rolle spielt. Die druckbare Elektronik kann viel von dem Yield Management der Silizium-Industrie lernen. Neben der Unterscheidung der drei Yield Komponenten Herstellungs-Yield, Test-Yield und Montage-Yield scheint vor allem das „Yield Learning“ auf die druckbare Elektronik übertragbar zu sein.⁶²⁶ So kann die Gutmenge durch systematische Verbesserungen des Produktionsprozesses von nur 20-30% einer Pilotfertigung auf ca. 50% bei Serienfertigung und im weiteren Verlauf auf etwa 80% gesteigert werden.⁶²⁷

Um die Betriebskosten einer Produktion abschätzen zu können, muss eine vorläufige **Personalplanung** durchgeführt werden. Bereiche, in denen je nach konkreter Situation Personal eingeplant werden muss, sind an jeder Bearbeitungsstation, im Lager, im Versand und in der Produktionsleitung. Darüber hinaus handelt es sich in diesem Fall um einen neuen Prozess, mit dem es noch keinerlei Erfahrung gibt. So muss von Beginn an von einem fehleranfälligen Prozessablauf ausgegangen werden. Deshalb müssen zu den Bereichen, die direkt der Produktion zuzuordnen sind, auch Ressourcen in den Bereichen Qualitätsüberwachung und Optimierung der Anlage bereitgestellt werden. Abhängig von der im Businessplan geplanten Produktionsmenge und der Kapazität der Anlage, müssen unter Umständen mehrere Arbeitsschichten eingeplant werden, was den Personalbedarf entsprechend erhöht.

Für eine endgültige Entscheidung bezüglich des Produktionskonzeptes müssen dessen **Kosten** mit dem Businessplan in Einklang gebracht werden. Die bei der Erstellung des Businessplans geschätzten Kosten gilt es nun mit einer höheren Genauigkeit zu bewerten. Ist das Produktionskonzept in der ersten Iteration vollständig, können die Kosten berechnet werden. Die Kosten werden hierbei in

⁶²⁵ vgl. Schnell (2011).

⁶²⁶ Eine intensive Betrachtung findet in Kapitel 3.3.4 statt.

⁶²⁷ vgl. El-Kareh/Ghatalia/Satya (1995).

Investitions- und Betriebskosten unterschieden.⁶²⁸ Für die Realisierung des Produktionskonzepts müssen folgende Investitionskosten aufsummiert werden: Kosten für die Produktionsanlage mit Substrattransport und allen Fertigungsverfahren, Kosten für den Reinraum, Kosten für die Installation und Inbetriebnahme, Kosten für das Lager und Transporteinheiten. Darüber hinaus müssen unter anderem die folgenden Kosten zu den Investitionskosten hinzugezählt werden: Entwicklungskosten für die Anlage, Kosten für die Produktentwicklung, Kosten für die Entwicklung des Produktionskonzepts, Kosten für Lizenzierung und Abnahme der Anlage durch unabhängige Prüfinstitute. Um die Wirtschaftlichkeit der betrachteten Geschäftsidee beurteilen zu können, müssen die Betriebskosten im Detail abgeschätzt werden. Die große Herausforderung im Feld der druckbaren Elektronik ist das Abschätzen der Entwicklung der Materialpreise. Da diese noch in kleinen und nicht optimierten Anlagen hergestellt werden, gibt es bei den Materialien noch große Kostensenkungspotentiale. Zu den Betriebskosten gehören neben den Material- und Substratkosten noch die Maschinenkosten, Infrastrukturkosten, Kosten für Miete sowie Personalkosten und Schulungskosten.

Die Kostenschätzungen unterliegen naturgemäß einer gewissen Unschärfe, die ein Risiko für die Beurteilung des Businessplans birgt. Um diese Unschärfe besser einschätzen zu können, kann die Szenarioanalyse angewendet werden. Hierfür werden unterschiedliche Szenarien gebildet, deren Auswirkungen dann analysiert werden.⁶²⁹ In diesem Falle bietet sich neben der realistischen Schätzung vor allem ein Best-Case- und an Worst-Case-Szenario an, um das Potential nach oben und nach unten abschätzen zu können. Nachdem das Konzept für die Produktion erarbeitet wurde und die Kosten dazu in drei Szenarien geschätzt vorliegen, werden diese Ergebnisse mit dem Businessplan abgeglichen. Diese Iterationsschleife kann wiederum Einfluss auf alle fünf Phasen des Innovationsprozesses haben. So ist denkbar, dass bei zu hohen Kosten die ersten vier Phasen erneut durchlaufen werden müssen, um das Device oder das Produktionskonzept zu überarbeiten.

⁶²⁸ In der hier betrachteten Kostenanalyse werden nur die Kosten für die Produktion näher erläutert. Für die endgültige Entscheidung über die Wirtschaftlichkeit und somit über die Qualität des Businessplans müssen noch die Gemeinkosten einer Unternehmung betrachtet werden und diese den möglichen Einnahmen gegenübergestellt werden.

⁶²⁹ vgl. Kapitel 6.1 oder Mietzner (2009).

5.2.5. 5. Phase: Umsetzung

Die fünfte Phase des Innovationsprozesses beschreibt die Umsetzung des iterativ optimierten Produktionskonzepts. Ziel dieser Phase ist der Start der Produktion der zuvor definierten Devices, um so die Produkte erfolgreich auf dem Markt einführen zu können. Wie in Abb. 5.12 dargestellt, sind mehrere Schritte notwendig, um das zuvor erstellte Konzept umzusetzen: Entwicklung und Bau der Maschinen, Installation der Anlage, Inbetriebnahme der Anlage sowie Testlauf und Abnahme der Anlage. Mit dem Start der Produktion beginnt auch die Einführung der Produkte in den Markt.

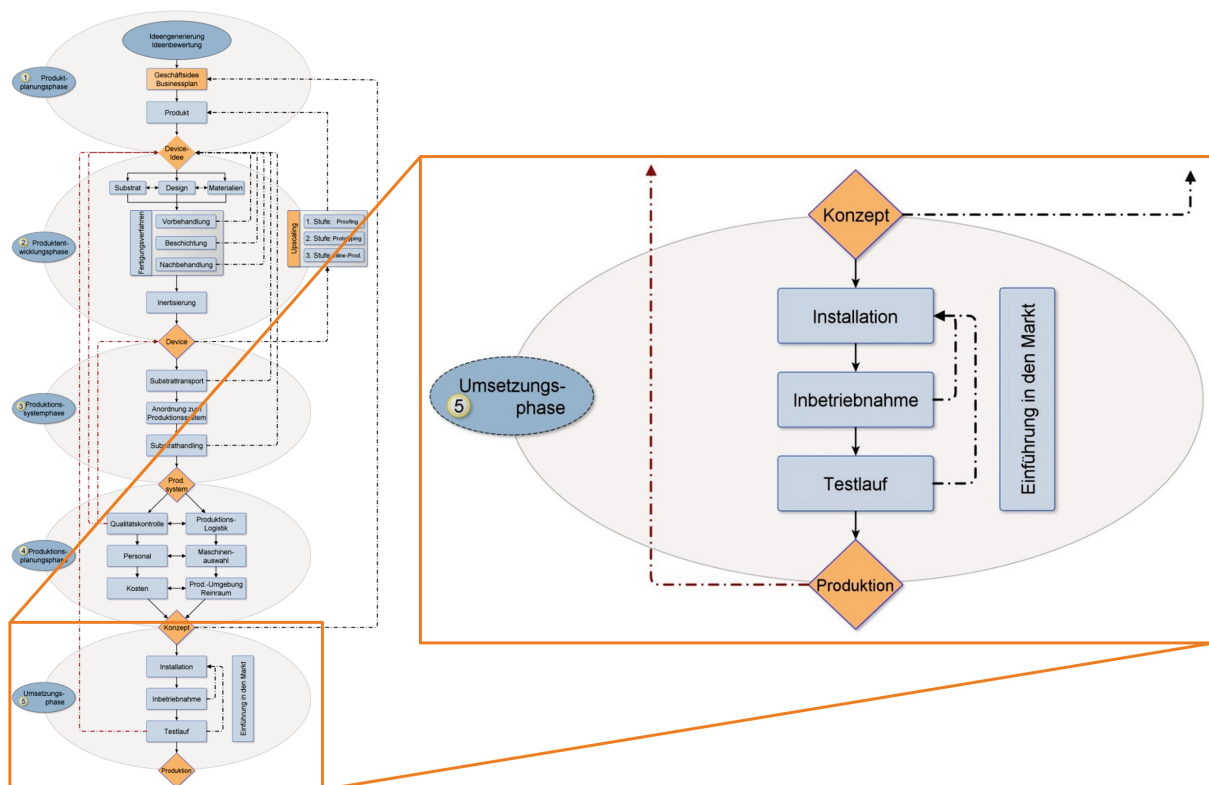


Abb. 5.12: Die fünfte Phase des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik ist die Umsetzungsphase

Sobald der Platzbedarf der Produktion, der Logistik und der restlichen Peripherie ermittelt ist, können entsprechende Immobilien ausgewählt werden. Parallel dazu können die Maschinen auf Basis des erstellten Lastenheftes entwickelt werden. Das ist notwendig, da die Technologie der druckbaren Elektronik noch sehr neu ist, und deshalb noch keine fertigen Anlagenkonzepte existieren, die an diese Produktion angepasst werden könnten. Umso schneller die Produktion aufgenommen werden kann, desto länger können als erster Marktanbieter die Preise als Monopolist bestimmt werden. Nach der Installation der Anlage wird diese in Betrieb genommen und der Testbetrieb wird gestartet. Der Ablaufplan

sieht nach dem Anlauf des Testbetriebes eine weitere Iterationsschleife vor, in der erneut Modifikationen an der Anlage, den Funktionsmaterialien, den Substraten oder an dem Device-Layout vorgenommen werden können.

In dieser Phase sind mehrere Iterationsschleifen notwendig. Zum einen wird bei einer Neuentwicklung einer solch komplexen Anlage nicht von Beginn alles nach Plan funktionieren, so dass nach der Inbetriebnahme und nach dem Testlauf noch Anpassungen an der Anlage vorgenommen werden müssen. Hierfür bietet sich das Yield-Management bzw. das Yield-Learning aus der Silizium-Industrie an.⁶³⁰ Zum anderen ergeben die Ergebnisse des Testlaufs auch Rückschlüsse für das Device und den zu Grunde liegenden Businessplan. Während es bei der technischen Lösungsfindung vor allem darum geht, ein Ergebnis zu erreichen, unabhängig von dem Aufwand (effektives Arbeiten), geht es bei der wirtschaftlichen Sichtweise darum ein Ergebnis mit möglichst geringen Mitteleinsatz zu erreichen (effizientes Arbeiten).⁶³¹ So muss die laufende Produktion aus technischer Sicht zeigen, dass die in den ersten beiden Phasen festgelegten Spezifikationen des Devices in der laufenden Produktion erreicht werden können. Aus wirtschaftlicher Sicht müssen die Ergebnisse des Testlaufs auch mit den im Businessplan festgelegten wirtschaftlichen Vorgaben abgeglichen werden. Dazu zählen alle Größen, die die Wirtschaftlichkeit der Unternehmung beeinflussen können, wie zum Beispiel die Gutmenge, die Produktionskosten oder der zu erreichende Output. Weichen diese Größen der Produktion deutlich von den Werten im Businessplan ab, müssen Lösungen gefunden werden, um die Produktion wirtschaftlicher zu gestalten.

Allgemein kann festgehalten werden, dass ein optimierter Innovationsprozess eine große Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit hat. So kann beispielsweise die Betrachtung der Qualitätssicherung von Beginn an wirtschaftlich von Vorteil sein. Werden das Device und dessen Herstellung unabhängig von der Qualitätssicherung optimiert, können spätestens bei der späteren Betrachtung der Qualitätssicherung erneute Anpassungen am Device oder dem Herstellprozess notwendig werden. Solche Nacharbeiten sind mit höheren Kosten und längeren Entwicklungszeiten verbunden, als wenn von Beginn an alle notwendigen Parameter beachtet werden.

⁶³⁰ vgl. Kapitel 3.3.4

⁶³¹ Effizientes Arbeiten kann neben dem Erreichen eines Ergebnisses mit möglichst geringen Mitteleinsatz auch bedeuten, mit einem bestimmten Mitteleinsatz einen möglichst großen Ertrag zu realisieren. vgl. Kapitel Wirtschaftlichkeit 2.3.3.

Schlussbetrachtung

In diesem Kapitel wurden die Erkenntnisse aller vorausgehenden Abschnitte zusammengeführt. So wurden die in Kapitel 3 analysierten Einflussparameter sowie die Ergebnisse der detaillierten Untersuchungen der wichtigsten Einflussparameter aus Kapitel 4 eingebunden. Hieraus wurde der aus der Literatur im Detail dargestellte Innovationsprozess auf die druckbare Elektronik adaptiert. Der Innovationsprozess wurde in die folgenden fünf Phasen eingeteilt, die auf dem Weg von der Idee bis zur Produktion durchlaufen werden müssen:

- 1) die Produktplanungsphase
- 2) die Produktentwicklungsphase
- 3) die Produktionssystemphase
- 4) die Produktionsplanungsphase
- 5) die Umsetzungsphase

Daraus wurde in diesem Kapitel eine Vorgehensweise entwickelt, welche für den allgemeinen Lösungsprozess eines Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik angewendet werden kann. Diese Vorgehensweise kann als Leitfaden für die Unternehmenspraxis angewendet werden, welche Unternehmen die Möglichkeit bietet, den Innovationsprozess der druckbaren Elektronik auf ihre Produktideen anzuwenden, um so von einer Produktidee zu einer funktionierenden Produktion zu gelangen.

Die entwickelte Vorgehensweise hat einen sehr iterativen Charakter und ist daher als operative Handlungsempfehlungen aufzufassen, die der Logik des hier notwendigen Handelns und der schrittweisen Lösungsentwicklung folgen. Die entwickelte Vorgehensweise ist als Richtschnur und nicht als starre Vorschrift zu verstehen. Sie ist zwar vom Ablauf her sequentiell anzusehen, muss aber an die jeweilige Situation flexibel angepasst werden. So kann es manchmal sinnvoll sein Arbeitsschritte zu überspringen, in einer anderen Reihenfolge durchzuführen oder mehrmals zu wiederholen. Ein Verzicht auf eine strukturierte Vorgehensweise würde aber angesichts des komplexen, mehrstufigen und iterativen Ablaufs dieses Innovationsprozesses zu einem nicht zielführenden Ergebnis führen.⁶³²

⁶³² vgl. Pahl u. a. (2007).

6. Wirtschaftliche Betrachtung

Wie aus dem in Kapitel 5 beschriebenen Innovationsprozess der druckbaren Elektronik hervorgeht, ist ein solcher Innovationsprozess nur bei gegebener Wirtschaftlichkeit durchführbar. Handelt es sich um eine neu zu gründende Unternehmung, wird die Frage der Wirtschaftlichkeit in dem Businessplan überprüft und dargestellt. Auch in einem bestehenden Unternehmen wird ein solcher Innovationsprozess nicht ohne positiv assistierte Wirtschaftlichkeit fortgeführt. Grundsätzlich muss die Wirtschaftlichkeit regelmäßig mit jeder neuen Erkenntnis hinterfragt und überprüft werden. Ein Instrument für diese regelmäßige Überprüfung ist der vorgestellte Stage-Gate-Prozess.

In Kapitel 6.1 wird deshalb eine wirtschaftliche Betrachtung einer in dem Innovationsprozess notwendigen Entscheidung durchgeführt. Für die Alternativen der Produktionssystemplanung aus Kapitel 4.4 wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt, um eine Entscheidung auf wirtschaftlicher Basis treffen zu können.

Darüber hinaus lässt sich aus dem Innovationsprozess der druckbaren Elektronik und der in den letzten Kapiteln dargestellten Komplexität der Entwicklung von druckbarer Elektronik ableiten, dass bereits in einem frühen Stadium die Notwendigkeit zur Zusammenarbeit mit anderen Partnern besteht. Die Notwendigkeit von Kooperationen wird in Kapitel 6.2 näher untersucht.

6.1. Wirtschaftlichkeitsanalyse der Produktionssystemplanung

Eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des gesamten Innovationsprozesses in einem Schritt ist äußerst komplex und ohne konkrete Produkte wenig aussagekräftig. Dafür fehlen die notwendigen Informationen.⁶³³ Allerdings ist es auch

⁶³³ Van Loon, Gilot, Barbu und Andriessen führen eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durch, die auf den Kostenschätzungen ihrer eigenen Versuche und Erfahrungen basiert. Deren Fokus ist vor allem die mögliche Kostenreduzierung durch Optimie-

nicht notwendig den gesamten Innovationsprozess auf einmal einer Wirtschaftlichkeitsanalyse zu unterziehen. Entlang dieses Innovationsprozesses ergeben sich viele Meilensteine (Gates), an denen eine Entscheidung über Alternativen oder über das generelle Fortführen des Innovationsprozesses getroffen werden muss. In diesen Situationen gilt es eine fundierte Entscheidung vorzubereiten, welche mit einer Wirtschaftlichkeitsanalyse unterstützt werden kann.

Als Beispiel für eine solche Wirtschaftlichkeitsanalyse wird im folgenden Abschnitt die in Kapitel 4.4 erarbeitete Investitionsentscheidung wirtschaftlich untersucht. Ziel ist es, die dort aus der Theorie hergeleiteten Anordnungsalternativen eines Produktionssystems auf ihre Wirtschaftlichkeit zu untersuchen. In diesem Fall können keine realen Prozesse analysiert werden, sondern die abstrakt hergeleiteten Alternativen. Das bedeutet, dass viele notwendige Inputfaktoren für die Wirtschaftlichkeitsanalyse geschätzt werden müssen oder Parameter wie der Yield der Produktionssysteme nicht berücksichtigt werden. Durch die Schätzung vieler Parameter unterliegt diese Wirtschaftlichkeitsanalyse einer gewissen Unsicherheit. Damit die Ergebnisse der Analyse interpretiert werden können, wird zuvor eine Szenarioanalyse durchgeführt. Hierfür werden drei Szenarien gebildet, die dann auf Ihre Wirtschaftlichkeit untersucht werden: ein realistisches Szenario, ein Best-Case-Szenario sowie ein Worst-Case-Szenario. Mit diesen drei Szenarien ist es möglich, die Wirtschaftlichkeit trotz der Unsicherheit der vielen Schätzungen besser beurteilen zu können.

6.1.1. Randbedingungen und Annahmen

Gegenstand der Wirtschaftlichkeitsanalyse sind die in Kapitel 4.4.1 erarbeiteten Alternativen die Bearbeitungsstationen zu einem Produktionssystem anzuordnen. Hierbei wurde der Fertigungsprozess nach den Kriterien Durchsatz, Durchlaufzeit und Leerzeit optimiert. Diese Größen konnten durch Maßnahmen wie Parallelisierung oder Reduzierung der Abrollvorgänge optimiert werden. Wie in Tabelle 6.1 dargestellt, sind dadurch fünf Systeme entstanden. Ausgangspunkt war ein System mit sieben Druckwerken, die komplett offline betrieben wurden.

rung der Materialien und des Layouts. Die Autoren betrachten die Optimierung des Produktionssystems nicht. Vgl. Van Loon u. a. (2012).

Bei System 1 wurden die langsamsten Prozessschritte mit parallel installierten Druckwerken pro Bearbeitungsstation erweitert, die alle offline betrieben wurden. In System 2 wurden die ursprünglich sieben Druckwerke in drei statt sieben Abrollvorgänge zusammengefasst, so dass hier von einem mittleren Integrationsgrad gesprochen werden kann. In System 3 wurden beide Lösungswege kombiniert eingesetzt. So werden die 17 Druckwerke in neun Abrollvorgänge integriert. System 4 integriert alle sieben Druckwerke in einer Abrolleinheit, die mit einem zusätzlichen Rollenwechsler ausgestattet ist.

Die fünf Alternativen unterscheiden sich zum Teil erheblich in ihren Leistungsdaten. Allerdings unterscheiden sich die Alternativen auch in Ihrer Komplexität und somit in ihrem Preis. Dementsprechend stellt sich bei den beschriebenen Alternativen die Frage nach der Wirtschaftlichkeit, um diese wirklich vergleichen zu können. Um die Frage der Wirtschaftlichkeit beantworten zu können, muss für jede Alternative der Nutzen dem Aufwand gegenüber gestellt werden. Da die Wirtschaftlichkeit in monetären Größen angegeben werden, müssen von den zu erwartenden Erlösen die Kosten abgezogen werden.

Tabelle 6.1 zeigt für die verschiedenen Produktionssysteme den Output, wie er in Kapitel 4.4.1 berechnet wurde. Neben den Leistungsdaten, Durchlaufzeit, Leerzeit und zeitlicher Durchsatz, zeigt die drittletzte Spalte die Anzahl der Substratrollen, welche von den Produktionssystemen pro Stunde mit OPV bedruckt werden können. Die dritte und vierte Spalte quantifizieren den dafür notwendigen Aufwand in Anzahl der verbauten Ab- und Aufrolleinheiten und Druckwerken. Hier wird ersichtlich, wie groß die Unterschiede im Output und im Aufwand der unterschiedlichen Alternativen sind. System 1 und System 3 zum Beispiel sind mit einem Durchsatz von 1,84 Rollen pro Stunde sehr produktiv, aber für diese Produktionssysteme werden wesentlich mehr Druckwerke sowie Ab- und Aufrolleinheiten benötigt, als bei den anderen Systemen. System 4 hingegen hat mit 0,74 Rollen pro Stunde einen geringeren Durchsatz, kommt aber mit sieben Druckwerken und einer Ab- und Aufrolleinheit inklusive Rollenwechsler aus. Die Kosten eines Rollenwechslers mit allen Folgekosten für Ausleger und Logistik wurden auf den Wert von zwei Aufrolleinheiten geschätzt, so dass in der Tabelle der Wert drei steht, obwohl nur eine Ab- und Aufrolleinheit benötigt wird.

Eine wirkliche Aussage über die Wirtschaftlichkeit lässt diese Tabelle allerdings nicht zu. Für eine Wirtschaftlichkeitsanalyse müssen die Größen Erlös und Aufwand in monetäre Größen umgewandelt werden. Im folgenden Abschnitt wird dargestellt, wie für diese Produktionssysteme die Wirtschaftlichkeit ermittelt werden kann.

Tabelle 6.1: Beurteilung der Ergebnisse der Produktionssysteme nach dem technischen Aufwand

Beschreibung der Produktionssysteme				Durch- laufzeit	Leerzeit zwischen Abrollv.	Leerzeit im Abrollv.	zeitlicher Durchsatz pro Rolle	Durchsatz Substrat- rollen pro Stunde
Variante	Optimierung durch	Abroll- einheiten	Druck- werke					
System 1	Parallelisierung	17	17	260	63	0	19	1,84
System 2	Abrollvorgänge	3	7	198	12	70	70	0,50
System 3	Parallelisierung & Abrollvorgänge	12	23	216	60	6	19	1,84
System 4	Rollenwechsler	3	7	47	0	176	47	0,74

Um die Wirtschaftlichkeit berechnen zu können, wird die in Kapitel 2.3.3.2 vorgestellte Kapitalwertmethode eingesetzt. Bei dieser Methode ist es notwendig, alle Auszahlung und Einzahlungen über die betrachteten Perioden zu berechnen. A_0 steht für die Auszahlung zum Zeitpunkt der Anschaffung $t = 0$. Jede weitere Auszahlung A_t und Einzahlung E_t wird mit dem gewählten Diskontierungszinssatz i auf ihren Barwert diskontiert. Am Ende des betrachteten Zeitraums $t = n$ kann ein Liquidationserlös L_n der Investition realisiert werden. Mit dieser Formel 2.13 wird daraus der Kapitalwert K_0 der Alternativen berechnet.

$$K_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E_t - A_t}{(1+i)^t} + \frac{L_n}{(1+i)^n} \quad \text{Formel 6.1}$$

Somit müssen die Aus- und Einzahlungen über die betrachteten Perioden zu berechnen. Dafür müssen viele Größen geschätzt werden, die in Tabelle 6.5 zusammengefasst sind. Zunächst werden die im folgenden Abschnitt verwendeten Variablen in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Auflistung der Variablen in Ergänzung zu den Variablen in Tabelle 4.4

K_0	Kapitalwert
A_0	Auszahlung zum Zeitpunkt der Anschaffung $t = 0$
t	Betrachtete Zeitperiode (hier in Jahren)
n	Ende des betrachteten Zeitraums $t = n$
h	Betriebsstunden pro Jahr
A_t	Auszahlung in der Periode t
E_t	Einzahlung in der Periode t
i	Zinssatz
L_n	Liquidationserlös nach der letzten Periode
$E_{(t)}$	Erlös für die Periode t
$G_{(R)}$	Gewinn pro mit OPV bedruckter Substratrolle
$G_{(m^2)}$	Differenz aus: (Erlöse – Mat-Kosten) pro m^2 eines OPV-Devices
$D_{(h)}$	Durchsatz pro Zeit (hier in Rollen pro Stunde)
$L_{(s)}$	Länge der Substratrolle (in Metern)
W_p	Watt peak (abgegebene elektrische Leistung unter Standard-Testbedingungen)
$K_{Mak(t)}$	Kosten der Makulatur für die Periode t
Mak	Anteil an Anschuss pro Substratrolle (in Meter)
$M_{(Ab)}$	Menge an Abrolleinheiten
$M_{(DW)}$	Menge an Druckwerken
$F_{(Ab)}$	Standfläche einer Abrolleinheit
$F_{(DW)}$	Standfläche eines Druckwerks
$K_{M(t)}$	Maschinenkosten für die Periode t
$K_{R(t)}$	Raumkosten für die Periode t
$K_{E(t)}$	Energiekosten für die Periode t
$K_{I(t)}$	Instandhaltungskosten für die Periode t
$K_{A(t)}$	Kalkulatorische Abschreibungen für die Periode t
$K_{W(t)}$	Werkzeugkosten für die Periode t
$K_{P(t)}$	Personalkosten für die Periode t
K_{P-Satz}	Personalkosten pro Ab- und Aufrolleinheit und Betriebsstunde
K_{R-Satz}	Raumkosten pro Quadratmeter und Betriebsstunde

Um dieses Wirtschaftlichkeitsanalyse übersichtlich zu halten, müssen einige Vereinfachungen vorgenommen werden, die in Tabelle 6.3 zusammengefasst sind. Mit diesen Vereinfachungen werden dann alle notwendigen Parameter abgeschätzt, um die Aus- und Einzahlungen berechnen zu können.

Tabelle 6.3: Vereinfachung für das Modell zur Betrachtung der Kosten

Zur Vereinfachung werden folgende Annahmen getroffen:

- 1) Für das Produktionssystem gibt es zunächst keine Budgetrestriktion.
- 2) Es werden nur die Kosten betrachtet, die unmittelbar die Fertigung betreffen. Kosten wie Verwaltungskosten oder Vertriebskosten werden nicht berücksichtigt.
- 3) Alle Produktionsfaktoren sind jederzeit unbegrenzt zu konstanten Preisen erhältlich.
- 4) Die Kosten werden für alle Fertigungsverfahren gleichgesetzt.
- 5) Pro Ab- und Aufrollvorgang ist immer der gleiche Personalaufwand notwendig, unabhängig der integrierten Bearbeitungsschritte.
- 6) Jeder Prozessschritt kann bei ausreichender Qualität durchgeführt werden.
- 7) Alle gefertigten Devices sind sofort zu konstanten Preisen und in jeder Menge absetzbar.

Als **Einzahlungen** sind die Erlöse $E_{(t)}$ aus den hergestellten Rollen mit OPV und dem Liquidationserlös L_n am Ende des Betrachtungszeitraums zu nennen. Der **Liquidationserlös** L_n wird auf 5% des Anschaffungswertes gesetzt. Das ist relativ niedrig, aber in einem neuen Markt sind noch sehr viele neue Innovationen in Technik und Prozessen zu erwarten, so dass diese Anlage dann als veraltet gelten wird.

Die **Erlöse** E_t berechnen sich aus dem Produkt des Durchsatzes pro Zeit $D_{(h)}$ (der hier in Anzahl von Rollen pro Zeit berechnet wird), der Länge einer Substratrolle $L_{(s)}$, dem zu erzielenden Verkaufspreis einer organischen Solarzellen pro Quadratmeter $G_{(m^2)}$ und der Anzahl der Stunden h . Der Verkaufspreis muss geschätzt werden, da bis heute keine Preise für solche Produkte existieren. Allerdings ist der Verkaufspreis auf Grund der noch nicht abschätzbaren Marktsituation schwer vorherzusagen.

Ziel dieser Wirtschaftlichkeitsanalyse ist nicht ein Businessplan für organische Photovoltaik aufzustellen, sondern die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Produktionssysteme zu untersuchen. Daher wird angenommen, dass eine solche Produktion nicht durchgeführt wird, wenn es nicht möglich ist, damit Gewinn zu erzielen. Da es aus heutiger Sicht nicht möglich ist, den Verkaufspreis von OPV und die Materialkosten der Funktionsfluide⁶³⁴ exakt abzuschätzen, wird die Differenz dieser beiden Summen $G_{(m^2)}$ abgeschätzt.⁶³⁵

$$E_t = D_{(h)} * L_{(s)} * G_{(m^2)} * h \quad \text{Formel 6.2}$$

Der Solarzellenmarkt hat sich in den letzten Jahren stark gewandelt und ist inzwischen von großer Konkurrenz geprägt. So weist der Solarzellenmarkt in allen fünf Bereichen des Fünf-Kräfte-Modells nach Porter starke Ausprägungen auf. Wie in Abb. 6.1 dargestellt, sind die fünf Kräfte Rivalität unter den bestehenden Wettbewerbern, Bedrohung durch neue Anbieter, Verhandlungsstärke der Lieferanten und Abnehmer sowie Bedrohung durch Ersatzprodukte.⁶³⁶

So kamen in den letzten Jahren sehr viele neue Wettbewerber in Asien hinzu und in den USA werden neue Wettbewerber erwartet. Zu den Solarzellen aus Silizium drängten neue Technologien auf den Markt wie verschiedene Dünnschichtsolarzellen. Die hier betrachtete Technologie der organischen Solarzellen wäre ein weiteres Ersatzprodukt, welches auf den Markt der Solarzellen drängt. Auch die Preise von Solarzellenmodulen sind seit Jahren unter Druck. Demgegenüber stehen weiterhin stark wachsende Märkte.⁶³⁷ Laut Müller-Meskamp u.a. (2012) dürfen bei den heutigen Strompreisen, organische Solarzellen unter optimistischen Annahmen von 10% Wirkungsgrad, Preis von 0,70 €/Wp einen Quadratmeterpreis von max. 70€ nicht überschreiten.⁶³⁸ Dennler und Brabec (2009) geben als Zielkosten für einen Quadratmeter OPV

⁶³⁴ Die Kosten für die eingesetzten Roh- und Hilfsstoffe, wie Substrate und Funktionsfluide, werden bewusst in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Da noch kein Markt für OPV-Zellen existiert, ist es sehr schwer eine Aussage darüber zu treffen. Die notwendigen Materialien sind auf Grund der sehr geringen Mengen, noch extrem teuer. Die reinen Materialkosten belaufen sich aktuell, je nach Zellenaufbau und eingesetzten Materialien, auf über 50 €/m². Auf Grund der geringen Effizienz und Haltbarkeit von OPV-Zellen, sind solche Preise am Markt nicht denkbar. Wann die Preise soweit fallen werden, dass sich eine solche Produktion lohnt, ist noch Gegenstand der Forschung.

⁶³⁵ Da in diesem Wert bereits die Kosten für Substrat und Funktionsfluid miteinbezogen wurden, werden diese Kosten in den Auszahlungen nicht weiter berücksichtigt.

⁶³⁶ vgl. Porter (1979); Porter (2008).

⁶³⁷ vgl. o A (2009).

⁶³⁸ vgl. Müller-Meskamp u. a. (2012).

50€/m² an.⁶³⁹ Dies scheint auf den ersten Blick hoch geschätzt, aber ist hier nicht weiter Gegenstand der Untersuchung. Sicher ist aber, dass die Leistungsdaten wie Effizienz und Haltbarkeit für einen erfolgreichen Markteintritt noch deutlich verbessert werden müssen.

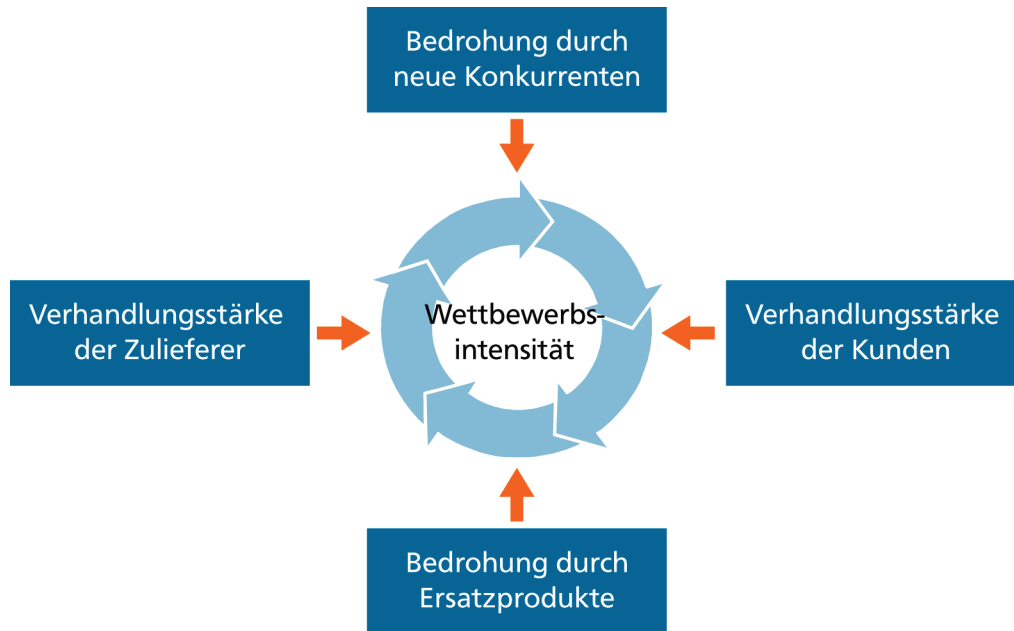


Abb. 6.1: Fünf-Kräfte-Modell nach Porter
 Quelle: In Anlehnung an Porter (1979) und Porter (2008)

Dem gegenüber stehen die Alleinstellungsmerkmale der organischen Solarzellen wie geringes Gewicht, freie Formbarkeit und geringe Dicke.⁶⁴⁰ Aktuell liegen die Preise für die eingesetzten Materialien noch deutlich über den hier geschätzten Verkaufspreis. Allerdings werden die eingesetzten Materialien deutlich im Preis fallen müssen, um auf diesem Markt konkurrenzfähig zu werden. So zeigen Loon u.a. und Andriessen, dass die Kosten pro Wattpeak durch neue Materialien, ITO-Ersatzmaterialien, neuen Schutzmaterialien und durch Ersetzen des Silbers durch Kupfer auf 0,5 \$/Wp sinken können.⁶⁴¹

Da der Verlauf der Preise hier nicht geschätzt werden kann, wird für den weiteren Verlauf dieser Untersuchung die Differenz aus Verkaufspreis und Materialkosten geschätzt. Für diese Untersuchung genügt diese Differenz zu betrachten, um Aussagen über die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen treffen zu können.⁶⁴²

⁶³⁹ vgl. Dennler/Brabec (2009).

⁶⁴⁰ vgl. Kapitel 2.1.1

⁶⁴¹ vgl. Van Loon u. a. (2012); Andriessen (2012).

⁶⁴² Allerdings reicht diese Vereinfachung für eine Beurteilung eines Businessplans nicht aus.

Für das realistische Szenario wird ein möglicher Wert für die Differenz aus Verkaufspreis und Materialkosten von $G_{(m^2)} = 0,35 \text{ €/m}^2$ abgeleitet. Für das Best-Case-Szenario wird dieser Wert mit $G_{(m^2)} = 0,50 \text{ €/m}^2$ und für das Worst-Case-Szenario mit $G_{(m^2)} = 0,30 \text{ €/m}^2$ angenommen.

Der **Durchsatz** wurde bereits berechnet und ist in Tabelle 6.1 in der drittletzten Spalte angegeben. Der Gewinn einer, mit Solarzellen bedruckten Substratrolle, berechnet sich aus dem Gewinn pro Quadratmeter, welcher mit der **Länge der Substratrolle** $L_{(s)}$, der **Breite** und der Anzahl produzierter Substratrollen pro Stunde $D_{(h)}$ multipliziert wird. Die Breite der Substratbahn wird vereinfacht mit einem Meter angenommen.

Die **Auszahlungen** sind zum einen der Anschaffungspreis zu Beginn des Betrachtungszeitraums und die Kosten, die während der laufenden Produktion anfallen.

Für die **Anschaffungskosten** werden zunächst die Kosten für ein Druckwerk und eine Ab- und Aufrolleinheiten geschätzt. Diese werden dann für das jeweilige Produktionssystem mit der Anzahl der notwendigen Druckwerke sowie Ab- und Aufrolleinheiten multipliziert.

$$A_0 = \sum \text{Kosten Druckwerke} + \sum \text{Kosten Ab – und Aufrolleinheiten} \quad \text{Formel 6.3}$$

Die Kosten für ein Druckwerk wird mit 140.000 € geschätzt. Die Kosten für eine Ab- und Aufrolleinheit inklusive der Regelung, dem Bedienpult und der notwendigen Logistik wird auf 900.000 € geschätzt.

Betriebskosten $K_{B(t)}$, die während der laufenden Produktion anfallen, sind Maschinenkosten $K_{M(t)}$, Personalkosten $K_{P(t)}$ und Makulaturkosten $K_{Mak(t)}$.

$$K_{B(t)} = K_{M(t)} + K_{P(t)} + K_{Mak(t)} \quad \text{Formel 6.4}$$

Die **Maschinenkosten** $K_{M(t)}$ berechnen sich aus den kalkulatorischen Abschreibungen $K_{A(t)}$, Raumkosten $K_{R(t)}$, Energiekosten $K_{E(t)}$, Instandhaltungskosten $K_{I(t)}$, und den Werkzeugkosten $K_{W(t)}$.⁶⁴³ Diese sind in Formel 6.5 dargestellt.

$$K_{M(t)} = K_{A(t)} + K_{R(t)} + K_{E(t)} + K_{I(t)} + K_{W(t)} \quad \text{Formel 6.5}$$

Die **kalkulatorischen Abschreibungen** berechnen sich aus der Summe der Wiederbeschaffungskosten abzüglich des Liquidationserlöses, geteilt durch die Abschreibungsperioden. Diese hängen also vor allem von dem Anschaffungskosten und der Anzahl der Abschreibungsperioden ab.

$$K_{A(t)} = \frac{(A_0 - L_n)}{n} \quad \text{Formel 6.6}$$

Die **Raumkosten** errechnen sich aus dem Produkt von Platzbedarf, Miete und Anzahl der Betriebsstunden. Für den Platzbedarf wird das Dreifache der Standfläche der Anlage angenommen. Dabei wird die Standfläche eines Druckwerks auf 2 m² und einer Ab- und Aufrolleinheit auf 4 m² geschätzt. Als Miete wird 120 € pro Quadratmeter und Monat angenommen.⁶⁴⁴ Dies entspricht in etwa $K_{R\text{-Satz}} = 0,35$ € pro Quadratmeter und Stunde. Zu den Raumkosten werden folglich nur die Kosten betrachtet, die direkt von der Produktion verursacht werden. Raumkosten, die durch Lager, Zwischenlager oder andere Logistik-Aktivitäten verursacht werden, sind in diesem Betrag nicht enthalten.

$$K_{R(t)} = K_{R\text{-satz}} * 3 * (2 * F_{DW} + 4 * F_{Ab}) * h \quad \text{Formel 6.7}$$

Die **Energiekosten** wurden ausgehend von der im Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt eingesetzten Druckmaschine Gallus RCS330-HD abgeschätzt.⁶⁴⁵ Somit werden für eine Ab- und Aufwickereinheit 20 kW und für ein Druckwerk 5 kW Leistung veranschlagt. Es wird davon ausgegangen, dass die Produktionsanlage im Schnitt 60% Maximalleistung benötigt. Diese Werte werden mit der Anzahl der Einheiten multipliziert und auf-

⁶⁴³ vgl. Hartel/Lotter (2006).

⁶⁴⁴ Zu den Raumkosten wird neben den Mieten vor allem die Kosten des notwendigen Reinraums hinzugerechnet. Bei einem Anschaffungspreis von maximal 10.000 €/m², der auf 10 Jahre abgeschrieben wird, fallen Kosten für den Reinraum von 84 € pro Quadratmeter und Monat an. Wird dazu noch die Wartung und der Betrieb des Reinraums sowie die Mieten für das Gebäude hinzugerechnet, belaufen sich die Raumkosten in etwa auf 120 € pro Quadratmeter und Monat.

⁶⁴⁵ vgl. Kapitel 4.2.2.

summiert. Die Gesamtleistung wird mit den Betriebsstunden und dem Strompreis multipliziert. Der Strompreis für Industriekunden liegt aktuell bei $K_{E\text{-Satz}} = 0,09 \text{ €/kWh}$.⁶⁴⁶

$$K_{E(t)} = (M_{(DW)} * 5 + M_{(Ab)} * 20) * 0,6 * K_{E\text{-satz}} * h \quad \text{Formel 6.8}$$

Die **Instandhaltungskosten** werden ausgehend von dem Anschaffungspreis geschätzt. Als Näherung wird in der Praxis häufig die Kosten in Abhängigkeit des Wiederbeschaffungswertes berechnet: „Für eine grobe Abschätzung der Instandhaltungskosten kann ein Wert zwischen 3 und 5% des Wiederbeschaffungswertes im Einschichtbetrieb und ein Wert zwischen 6 und 10% im Zweischichtbetrieb oftmals als hinreichend genau angenommen werden.“⁶⁴⁷ In diesem Fall wird bei einem Zweischichtbetrieb von 6% ausgegangen.

$$K_{I(t)} = A_0 * 6\% \quad \text{Formel 6.9}$$

Die **Personalkosten** einer solchen Produktionsanlage hängen entscheidend von der Anzahl der eingesetzten Ab- und Aufrolleinheiten ab. Pro Ab- und Aufrolleinheit fallen folgende Arbeiten an: Bedienen der Maschine, Einrichten und Rüsten der Maschine sowie Handling der unbedruckten und bedruckten Substrate. Diese Aufgaben setzen mindestens einen gelernten Arbeiter voraus. Für die Handlings- und Einrichtungsarbeiten muss noch ein zusätzlicher ungelernter Arbeiter miteinbezogen werden. Die Stundenlöhne wurden aus der Studie „Kosten- und Leistungsgrundlagen für Klein- und Mittelbetriebe in der Druck- und Medienindustrie“ vom BVDM übernommen. Die liegen bei sehr hochwertigen Arbeiten bei etwa 40 €/h und bei weniger aufwendigen Arbeiten bei etwa 25 €/h.⁶⁴⁸ Der Kalkulation liegt ein zwei Schichtbetrieb mit zwölf Schichten pro Woche zu Grunde.

$$K_{P(t)} = K_{P\text{-satz}} * M_{Ab} * h \quad \text{Formel 6.10}$$

⁶⁴⁶ vgl. o A (2012a).

⁶⁴⁷ Hartel/Lotter (2006).

⁶⁴⁸ vgl. BVDM (2004).

Die **Werkzeugkosten** werden hier als Durchschnittswert für alle Fertigungsverfahren berechnet. Da aus heutiger Sicht nicht klar ist, welche Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen, werden in der Betrachtung beispielhaft die Werkzeugkosten von Flexodruck, Siebdruck und Tiefdruck näher untersucht. Die Berechnung ist in Tabelle 6.4 dargestellt. Beim Flexodruck müssen in regelmäßigen Abständen die Druckform, die Druckform (hier Klischee), sowie die Rasterwalze und die Rakel gewechselt werden. Die Rasterwalze wird in diesem Fall nur erneuert, so dass maximal mit einem Betrag von 1.000 € zu rechnen ist. Pro Stunde fallen beim Flexodruck ca. 20 € an Werkzeugkosten an. Beim Rollensiebdruck müssen jeden Tag das Sieb und die Rakel getauscht werden, so dass pro Stunde 46,43 € anfallen. Für den Tiefdruck müssen neben dem Druckzylinder und der Rakel auch zwei Mal im Jahr der Presseur getauscht werden. Die Kosten betragen ca. 13 € pro Stunde. Im Schnitt wird somit mit einem Stundensatz von 26,50 € gerechnet.

Tabelle 6.4: Berechnung der Werkzeugkosten beispielhaft für Flexo-, Sieb- und Tiefdruck.

Druckverfahren	Werkzeugart	Wechselintervall	Kosten	Kosten / h
Flexo	Klischee	1 mal pro Tag	100,00 €	7,14 €
	Rasterwalze	1 mal pro Woche	1.000,00 €	11,90 €
	Rakel	1 mal pro Tag	10,00 €	0,71 €
				19,76 €
Siebdruck	Rollensieb	1 mal pro Tag	600,00 €	42,86 €
	Rakel	1 mal pro Tag	50,00 €	3,57 €
				46,43 €
Tiefdruck	Presseur	2 mal im Jahr	1.000,00 €	0,46 €
	Druckzylinder	1 mal pro Woche	1.000,00 €	11,90 €
	Rakel	1 mal pro Tag	10,00 €	0,71 €
				13,08 €

Die **Makulaturkosten** berechnen sich aus der Summe der anfallenden Makulatur multipliziert mit den Opportunitätskosten, welche dem Verkaufspreis entsprechen. In dieser Betrachtung wurde bisher der Verkaufspreis auf etwa 18 €/m² festgelegt. Die Summe der Makulatur wird pro zu bedruckender Rolle auf 40 m geschätzt. Selbst in einem sich immer wiederholenden und perfektionierten Prozess benötigt die Anlage eine gewisse Regelzeit, bis der Druckprozess wieder im Gleichgewicht ist und das Register wieder eingestellt ist. Bei Produktionsanlagen mit Rollenwechsler bleibt die Anlage gewissermaßen im-

mer im Gleichgewicht. Somit fällt die Makulatur nur beim Anfahren der Anlage an. In diesem Beispiel läuft die Produktionsanlage sieben von acht Stunden pro Schicht. Daher muss die Maschine einmal pro Schicht hochgefahren werden, so dass die Makulatur alle sieben Betriebsstunden anfällt. An der Klebestelle kann es trotzdem für jede Substratrolle zu kleinen Abweichungen kommen, die in diesem Beispiel nach fünf Metern wieder ausgeregelt sind.

$$K_{Mak(t)} = D_{(h)} * h * Mak * 18 \text{ €/m}^2 \quad \text{Formel 6.11}$$

$$K_{Mak(t)} = (Arbeits\text{schichten} * 40m + D_{(h)} * h * 5m) * 18 \text{ €/m}^2 \quad \text{Formel 6.12}$$

Die notwendigen Eingangsgrößen, die geschätzt werden müssen, sind in Tabelle 6.5 zusammengetragen. Die Tabelle enthält neben den hier bereits vorgestellten Werten für das realistische Szenario, auch die Werte für das Best-Case- und das Worst-Case-Szenario. Die wurden von dem Autor so geschätzt, dass in dem Best-Case Szenario hauptsächlich die positiven und im Worst-Case-Szenario hauptsächlich die negativen Entwicklungsmöglichkeiten berücksichtigt wurden.⁶⁴⁹

Zu den bereits beschriebenen Werten enthält Tabelle 6.5 noch folgende Werte: Die erste Zeile der Personalkosten zeigt die Informationen, wie viele gelernte (G) und ungelernte (U) Arbeiter pro Abrolleinheit eingesetzt werden müssen. Die zweite Zeile zeigt den dazu passenden Stundensatz. Die erste Zeile der weiteren Einflussgrößen gibt die Betriebsstunden pro Jahr an. Dabei wird von einem Zwei-Schicht-Betrieb ausgegangen. In der Woche werden 12 Schichten eingeplant. Die Produktionssysteme sind sieben von acht Stunden pro Schicht im Betrieb. Ein Stunde pro Schicht wird für Rüsten, Reinigung, Wartung und andere Arbeiten eingeplant. Somit sind die Produktionssysteme 4.368 Betriebsstunden pro Jahr im Einsatz. In der darauf folgenden Zeile sind die Betriebsjahre der Anlage angegeben. Da es sich um eine relativ neue Technologie handelt und in den nächsten Jahren weitere Innovationen in Maschinen und Prozessen zu erwarten sind, wird eine relativ kurze Einsatzdauer von sechs Jahren angenommen. Der Zinssatz, zu dem das Kapitel verzinst wird, beläuft sich für alle Szenarien auf 8%. Die Länge einer Substratrolle wird mit 5.000 m angenommen.

⁶⁴⁹ Bei der Schätzung wurde die Perspektive eines Unternehmers (Produzenten) eingenommen, der plant in eine Produktionsanlage zu investieren.

Tabelle 6.5: Werte für die drei Szenarien der Wirtschaftlichkeitsanalyse

		Realistic Case	Worst Case	Best Case	
Anschaf- fungs- kosten	Kosten Abrolleinheiten	900.000,00	1.100.000,00	700.000,00	€
	Kosten Druckwerke	140.000,00	240.000,00	80.000,00	€
Personal- kosten	pro Stunde & Abrollereinheit	1 x G + 1 x U.	1 x G + 2 x U.	1 x G	
		65,00	90,00	40,00	€/h
Maschinen- kosten	Kosten pro m ² /h	0,35	0,50	0,30	€/(m ² h)
	Fläche Abroll.	4	4	4	m ²
	Fläche Druckw.	2	2	2	m ²
	Energiepreis	0,09	0,09	0,09	€/kWh
	Instandhaltungs- kostensatz	6,00%	10,00%	3,00%	%
	Werkzeugkosten pro Stunde	16,50	25,00	10,00	€/h
Erlös	VK - Materialkosten	0,50	0,35	0,80	€/m ²
	Differenz pro Substratrolle	2500,00	1750,00	4000,00	€/Rolle
weitere Einfluss- größen	Betriebsstunden pro Jahr	4.368	4.368	4.368	h
	Anzahl der Betriebsjahre	6	6	6	Jahre
	Zinssatz	8,00%	8,00%	8,00%	%
	Makulatur pro Substratrolle	40	60	30	m
	Makulatur pro Klebestelle	5	10	3	m
	Länge der Substratrolle	5.000	5.000	5.000	m

6.1.2. Ergebnisse

Tabelle 6.6 zeigt die fünf Varianten der Produktionssysteme, die mit den Werten aus Tabelle 6.5 berechnet wurden. Die ersten beiden Spalten beschreiben die Produktionssysteme. Die Spalten drei und vier zeigen die Anzahl der jeweils

verbauten Ab- und Aufrolleinheiten sowie der Druckwerke. Die Spalten fünf und sechs beschreiben den Durchsatz des Produktionssystems. Spalte fünf zeigt den Durchsatz in Anzahl der Substratrollen pro Stunde und Spalte sechs zeigt den Durchsatz in Anzahl der Substratrollen pro Jahr. Spalte sieben zeigt die pro Jahr bedruckte Fläche an Solarzellen in Quadratkilometer, während in der achten Spalte für die Jahresproduktion die maximale Leistung in GW_p angegeben ist. In der letzten Spalte stehen die Anschaffungskosten der Produktionssysteme.

Tabelle 6.6: Charakteristiken der fünf Produktionssysteme

Beschreibung der Produktionssysteme				Durchsatz Substratrollen		Geschwindigkeit	Fläche der Solarzellen	max. Leistung d. Solarzellen	Anschaffungskosten
Variante	Optimierung durch	Abroll-einheiten	Druckwerke	pro Stunde	pro Jahr	m/min	in km^2 / Jahr	GW_p / Jahr	in Tausend Euro
System 1	Parallelisierung	17	17	1,84	8.046	n.a.	40,23	0,80	17.680
System 2	Abrollvorgänge	3	7	0,50	2.184	41,67	10,92	0,22	3.680
System 3	Parallelisierung & Abrollvorgänge	12	23	1,84	8.046	n.a.	40,23	0,80	14.020
System 4	Rollenwechsler	3	7	0,74	3.253	62,06	16,26	0,33	3.680

Die Systeme 1 und 3 sind mit Abstand die leistungstärksten Systeme und haben eine Kapazität von 8.046 Substratrollen pro Jahr. Die Menge an Solarzellen entspricht einer maximalen Leistung von $0,80 \text{ GW}_p$. Dies ist zum einen möglich, da alle langsamen Prozesse durch parallel eingesetzte Maschinen optimiert wurden. Zum anderen können alle Maschinen mit optimaler Geschwindigkeit betrieben werden, da jedes Druckwerk in eine extra Ab- und Aufrolleinheit integriert wurde. Die Kosten des Produktionssystems 1 belaufen sich auf 17,7 Millionen Euro und die Kosten von System 3 belaufen sich auf 14,0 Millionen Euro. Das zweite Produktionssystem wurde so optimiert, dass die Abrollvorgänge reduziert werden. Durch den Einsatz von nur drei Ab- und Aufrolleinheiten sowie sieben Druckwerken, sinken die Anschaffungskosten auf 3,7 Millionen Euro. Die Kapazität sinkt auf ein Viertel, auf ca. $0,22 \text{ GW}_p$ pro Jahr. Das letzte Produktionssystem ist ein sogenanntes Inlinesystem, in dem alle Bearbeitungsschritte in einer Ab- und Aufrollstation durchgeführt werden. Zusätzlich wurde dieses System mit einem automatischen Rollenwechsler ausgestattet. Die

Kapazität liegt bei etwa 0,33 GW_p pro Jahr. Der Anschaffungspreis ist relativ niedrig und liegt bei 3,7 Millionen Euro.⁶⁵⁰ Tabelle 6.7 zeigt neben den Anschaffungspreisen der Produktionssysteme auch die erzielbaren Erlöse pro Jahr sowie den Restwert nach der Abschreibungsdauer von sechs Jahren. Der Erlös ist proportional zum Durchsatz, so dass die System 1 und 3 mit 20,1 Millionen Euro den meisten Erlös pro Jahr erwirtschaften kann.

Tabelle 6.7: Gegenüberstellung der Anschaffungskosten und der Erlöse der Varianten im realistischen Szenario

Beschreibung der Produktionssysteme				Durchsatz Substratrollen		Anschaffungskosten	Erlös pro Jahr	Restwert
Variante	Optimierung durch	Abroll-einheiten	Druck-werke	pro Stunde	pro Jahr	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro
System 1	Parallelisierung	17	17	1,84	8.046	17.680	20.116	884
System 2	Abrollvorgänge	3	7	0,50	2.184	3.680	5.460	184
System 3	Parallelisierung & Abrollvorgänge	12	23	1,84	8.046	14.020	20.116	701
System 4	Rollenwechsler	3	7	0,74	3.253	3.680	8.132	184

Diese Angaben genügen allerdings noch nicht für eine abschließende Beurteilung der Wirtschaftlichkeit. Zur Berechnung des Kapitalwerts müssen neben den Anschaffungskosten und Erlösen noch die Betriebskosten ermittelt werden. Die Betriebskosten setzen sich aus den Personalkosten, Makulaturkosten und Maschinenkosten zusammen und fallen in jeder Periode erneut an. Die Maschinenkosten wiederum sind die Summe aus den Werkzeugkosten, Energiekosten, Instandhaltungskosten, kalkulatorische Abschreibungen und den Raumkosten.

Tabelle 6.8 zeigt die Berechnung der Maschinenkosten. Unter den berechneten Werten der einzelnen Komponenten der Maschinenkosten stehen in grauer Schrift die Prozentangaben, wie groß deren Anteil an den Maschinenkosten ist. Die Energiekosten machen nur etwa 2,5-3% aus und fallen somit kaum ins Ge-

⁶⁵⁰ System 4 ist mit drei Abrollereinheiten in der Tabelle aufgeführt. Allerdings hat dieses System nur eine Abrollereinheit. Die Kosten für den automatischen Rollenwechsler, der Anpassungen in der Maschinensteuerung, der Logistik und der Aufrollereinheit werden mit den Kosten von zwei Abrollereinheiten gleich gesetzt.

wicht. Das liegt unter anderem daran, dass die Kosten der energieintensiven Nachbearbeitungsprozesse hier nicht betrachtet wurden. Diese Kosten wurden als Materialkosten in die Größe „Erlös pro Jahr“ mit einbezogen. Die Raumkosten sind mit 8% der Maschinenkosten trotz der Notwendigkeit eines teuren Reinraums relativ niedrig. Das liegt zum einen daran, dass der Reinraum auf einen längeren Zeitraum von 10 Jahren abgeschrieben werden kann und zum anderen an den zum Teil recht kleinen Abmaßen der Anlagen. Den größten Anteil der Maschinenkosten haben die Abschreibungen mit etwa 40-50%, die Werkzeugkosten mit 21-35% sowie die Instandhaltungskosten mit etwa 15-19%. Die Maschinenkosten sind bei den Systemen 2 und 4 am geringsten. Diese betragen etwa nur ein Viertel der Maschinenkosten der System 1. Der Grund liegt darin, dass die Produktionssysteme 2 und 4 nur aus drei Abrolleinheiten und sieben Druckwerken bestehen, während in dem ersten Produktionssystem 17 Abrolleinheiten und 17 Druckwerke notwendig sind.

Tabelle 6.8: Kosten der Varianten für das realistische Szenario

Beschreibung der Produktionssysteme		Maschinenkosten	Werkzeugkosten	Energiekosten	Instandhaltungskosten	Kalkulatorische Abschreibungen	Raumkosten
Variante	Optimierung durch	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro
System 1	Parallelisierung	5.720	1.225	167	1.061	2.799	468
		35,29%	21,42%	2,92%	18,54%	48,94%	8,18%
System 2	Abrollvorgänge	1.465	505	37	221	583	119
		38,00%	34,45%	2,55%	15,08%	39,78%	8,14%
System 3	Parallelisierung & Abrollvorgänge	5.289	1.658	140	841	2.220	431
		36,83%	31,34%	2,64%	15,90%	41,97%	8,15%
System 4	Rollenwechsler	1.465	505	37	221	583	119
		48,15%	34,45%	2,55%	15,08%	39,78%	8,14%

Tabelle 6.9 zeigt nun neben den Maschinenkosten auch alle anderen Kosten. So ergibt die Summe aus den Maschinenkosten, Makulaturkosten und Personalkosten die Betriebskosten. Hierbei fällt auf, dass bei den Systemen 1 bis 3 die Betriebskosten in etwa gleich auf die drei Kategorien Personal-, Makulatur- und Maschinenkosten aufgeteilt sind. Die Personalkosten sind mit 22-30% der kleinste Kostenfaktor. Die Maschinen- und Makulaturkosten haben bei den ersten drei Systemen fast den gleichen Anteil an den Betriebskosten. Der Anteil liegt zwischen 35 und 40%. Nur bei dem System mit Rollenwechsler können die Makulaturkosten deutlich gesenkt werden, so dass deren Anteil auf 24%

sinkt. Die Maschinenkosten hängen in erster Linie von der Anzahl der verbauten Abrolleinheiten und Druckwerken ab, so dass sich diese nicht beliebig senken lassen.

Das System 1 verursacht mit Abstand die meisten Betriebskosten (in etwa fünf Mal so viel wie System 4), kann aber auch die meisten Erlöse pro Jahr erzielen (in etwa zweieinhalb Mal so viel wie System 4). Obwohl System 1 mit Abstand die meisten Erlöse pro Jahr erwirtschaftet, ist dessen Kapitalwert in dem realistischen Szenario am niedrigsten. Dies liegt vor allem an den hohen Anschaffungs- und Betriebskosten. Den höchsten Kapitalwert hat System 4, da hier die geringsten Anschaffungs- und Betriebskosten anfallen. Das zweitbeste Ergebnis erzielt System 3. Die Parallelisierung ermöglicht einen großen Durchsatz und somit einen großen Erlös. Die Reduzierung der Abrollvorgänge ermöglicht eine Reduzierung der Anschaffungs- und Betriebskosten. Somit sollte bei dem realistischen Szenario das fünfte Produktionssystem mit Rollenwechsler gewählt werden.

Tabelle 6.9: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für das realistische Szenario

Beschreibung der Produktionssysteme		Anschaffungskosten	Betriebskosten	Personalkosten	Makulaturkosten	Maschinenkosten	Erlös pro Jahr	Kapitalwert
Variante	Optimierung durch	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro
System 1	Parallelisierung	17.680	16.211	4.827	5.665	5.720	20.116	6.213
			100,00%	29,77%	34,94%	35,29%		
System 2	Abrollvorgänge	3.680	3.854	852	1.538	1.465	5.460	5.883
			100,00%	22,10%	39,90%	38,00%		
System 3	Parallelisierung & Abrollvorgänge	14.020	14.361	3.407	5.665	5.289	20.116	20.305
			100,00%	23,72%	39,44%	36,83%		
System 4	Rollenwechsler	3.680	3.042	852	726	1.465	8.132	26.034
			100,00%	28,00%	23,85%	48,15%		

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse für das Worst-Case- und das Best-Case-Szenario vorgestellt. Die Ergebnisse werden in der gleichen Darstellungsform dargestellt wie in Tabelle 6.9.

In Tabelle 6.10 sind die Ergebnisse für das **Worst-Case-Szenario** dargestellt. Auffällig an diesem Ergebnis ist vor allem, dass vier von fünf Kapitalwerten teilweise sehr deutlich negativ sind. Das heißt, dass die Systeme 1 bis 3 in dem angenommenen Worst-Case-Szenario die angestrebte Verzinsung des Kapitals

von 8% nicht garantieren und sogar deutlich Verlust erwirtschaften. Der Kapitalwert des ersten Systems liegt unter diesen Umständen bei -77,1 Millionen Euro. Nur das System 4 mit dem Rollenwechsler schafft es unter diesen Umständen einen kleinen positiven Kapitalwert zu erreichen. Der Kapitalwert beträgt für den betrachteten Zeitraum 1,3 Millionen Euro.

Tabelle 6.10: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für das Worst-Case-Szenario

Beschreibung der Produktionssysteme		Anschaffungskosten	Betriebskosten	Personalkosten	Makulaturkosten	Maschinenkosten	Erlös pro Jahr	Kapitalwert
Variante	Optimierung durch	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro
System 1	Parallelisierung	22.780	23.757	6.683	8.497	8.577	14.081	-77.057
			100,00%	28,13%	35,77%	36,10%		
System 2	Abrollvorgänge	4.980	5.744	1.179	2.306	2.259	3.822	-15.730
			100,00%	20,53%	40,15%	39,32%		
System 3	Parallelisierung & Abrollvorgänge	18.720	21.317	4.717	8.497	8.103	14.081	-59.189
			100,00%	22,13%	39,86%	38,01%		
System 4	Rollenwechsler	4.980	4.669	1.179	1.231	2.259	5.692	1.306
			100,00%	25,26%	26,37%	48,37%		

Unter den Bedingungen des Worst-Case-Szenarios müsste, wie unter den Bedingungen des realistischen Szenarios, das fünfte Produktionssystem mit Rollenwechsler gewählt werden.

In der folgenden Tabelle 6.11 sind die Ergebnisse für das **Best-Case-Szenario** dargestellt. Unter den Umständen des Best-Case-Szenarios erreichen alle Produktionssysteme einen positiven Kapitalwert. Das vierte System mit dem Rollenwechsler ist allerdings unter diesen Bedingungen mit einem Kapitalwert von über 60 Millionen Euro nur das viert-beste Produktionssystem. Das erste System ist mit einem Kapitalwert von etwa 107,8 Millionen Euro deutlich besser und das dritte System ist mit einem Kapitalwert von über 118 Millionen Euro mit Abstand das wirtschaftlichste Produktionssystem.

Somit sollte unter den Bedingungen des Best-Case-Szenarios das vierte Produktionssystem gewählt werden.

Tabelle 6.11: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für das Best-Case-Szenario

Beschreibung der Produktionssysteme		Anschaffungskosten	Betriebskosten	Personal-kosten	Makulatur-kosten	Maschinen-kosten	Erlös pro Jahr	Kapitalwert
Variante	Optimierung durch	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro
System 1	Parallelisierung	13.260	11.424	2.970	4.248	4.206	32.185	107.806
			100,00%	26,00%	37,19%	36,81%		
System 2	Abrollvorgänge	2.660	2.703	524	1.153	1.026	8.736	32.431
			100,00%	19,39%	42,66%	37,96%		
System 3	Parallelisierung & Abrollvorgänge	10.240	10.095	2.097	4.248	3.749	32.185	118.295
			100,00%	20,77%	42,09%	37,14%		
System 4	Rollenwechsler	2.660	2.051	524	501	1.026	13.011	60.929
			100,00%	25,55%	24,43%	50,02%		

Übersicht über alle drei Szenarien

Im Vergleich der Ergebnisse aller drei Szenarien ist das System 4 in dem realistischen und dem Worst-Case-Szenario die beste Alternative. Nur im Best-Case-Szenario ist das System 3 das Beste. Allerdings erwirtschaftet das System 3 im Worst-Case-Szenario mit einem Kapitalwert von -59,2 Millionen Euro einen sehr großen Verlust. Das System 4 erwirtschaftet auch unter den schlechtesten Bedingungen noch einen kleinen Gewinn. Daher stellt das System 4 mit dem Rollenwechsler die sicherste Investitionsalternative dar.

Die hier dargestellten Produktionssysteme sind nicht vollständig miteinander vergleichbar. Im Best-Case-Szenario sind für das System 3 ca. 10,2 Millionen Euro an Kapital notwendig, während für das System 4 etwa 2,7 Millionen Euro genügen. Somit könnten für die gleiche Summe von System 3 fast vier Systeme 4 mit Rollenwechsler installiert werden. Um diese Systeme besser miteinander vergleichen zu können, werden in dem folgenden Beispiel vier der Produktionssysteme mit Rollenwechsler, deren Anschaffungskosten sich auf 10,6 Millionen Euro belaufen, mit dem System 4 verglichen.

Tabelle 6.12 zeigt die Ergebnisse für das Best-Case-Szenario, in dem zuvor das System 3 dem System 4 auf Grund des höheren Kapitalwertes vorzuziehen war. In dem Best-Case erreicht das neue System einen Kapitalwert von über 240 Millionen Euro. Der Kapitalwert ist somit doppelt so hoch, wie der von System 3.

Tabelle 6.12: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für das Best-Case-Szenario mit erweitertem System 4

Beschreibung der Produktionssysteme		Anschaffungskosten	Betriebskosten	Personalkosten	Makulaturkosten	Maschinenkosten	Erlös pro Jahr	Kapitalwert
Variante	Optimierung durch	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro	in Tausend Euro
System 1	Parallelisierung	13.260	11.424	2.970	4.248	4.206	32.185	107.806
			100,00%	26,00%	37,19%	36,81%		
System 2	Abrollvorgänge	2.660	2.703	524	1.153	1.026	8.736	32.431
			100,00%	19,39%	42,66%	37,96%		
System 3	Parallelisierung & Abrollvorgänge	10.240	10.095	2.097	4.248	3.749	32.185	118.295
			100,00%	20,77%	42,09%	37,14%		
System 4	Rollenwechsler	2.660	2.051	524	501	1.026	13.011	60.929
			100,00%	25,55%	24,43%	50,02%		
4 x System 4	4 x System 4 Rollenwechsler	10.640	8.206	2.097	2.005	4.104	52.044	243.716
			100,00%	25,55%	24,43%	50,02%		

Vier Systeme 4 bieten darüber hinaus noch die Möglichkeit, in Stufen zu investieren, und bieten dabei die Sicherheit, selbst im Worst-Case-Szenario immer noch einen Gewinn zu erwirtschaften. Sollte es möglich sein, die Produktion über die Kapazität von System 4 zu steigern, können mehrere dieser Systeme parallel aufgebaut werden. Im Vergleich der Produktionssysteme, wie sie in Kapitel 4.4 beschrieben wurden, sollte am ehesten das System 4 bzw. ein Vielfaches des Systems 4 gewählt werden. Wie in Abbildung Abb. 6.2 dargestellt, sind bei diesen beiden Varianten zum einen die Kapitalwerte immer positiv, und zum anderen ist der Erwartungswert der Kapitalwerte bei System 4 und 4 x System 4 über alle drei Szenarien am höchsten.

Bei der Berechnung des Erwartungswerts wurde von der gleichen Wahrscheinlichkeit für alle drei Szenarien von einem Drittel ausgegangen. Die Erwartungswerte sind für alle Varianten positiv. Der Erwartungswert des Kapitalwertes ist für System 4 mit ca. 30 Millionen Euro mindestens doppelt so groß, wie bei den Systemen 1 und 2. Der Erwartungswert für System 3 liegt bei 26,5 Millionen Euro. Der Erwartungswert für 4 x System 4 liegt bei über 115 Millionen Euro. Diese Wirtschaftlichkeitsanalyse lässt allerdings noch keinen Rückschluss zu, ob bei einer solchen Produktion wirklich ein Gewinn erwirtschaftet werden kann. Dafür gab es zu viele Vereinfachungen in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Hierfür müssten mehr Informationen über die Absatzmärkte und deren Entwicklung sowie über die Beschaffungsmärkte der Materialien eingeholt werden.

Allerdings eignet sich diese Analyse zur Unterstützung der Entscheidungsfindung, welches der vorgestellten Produktionssysteme ausgewählt werden soll. Um die Entscheidung noch weiter zu unterstützen, wurden in Tabelle 6.13 die Betriebskosten der Produktionssysteme pro produzierten Quadratmeter Solarzelle berechnet.

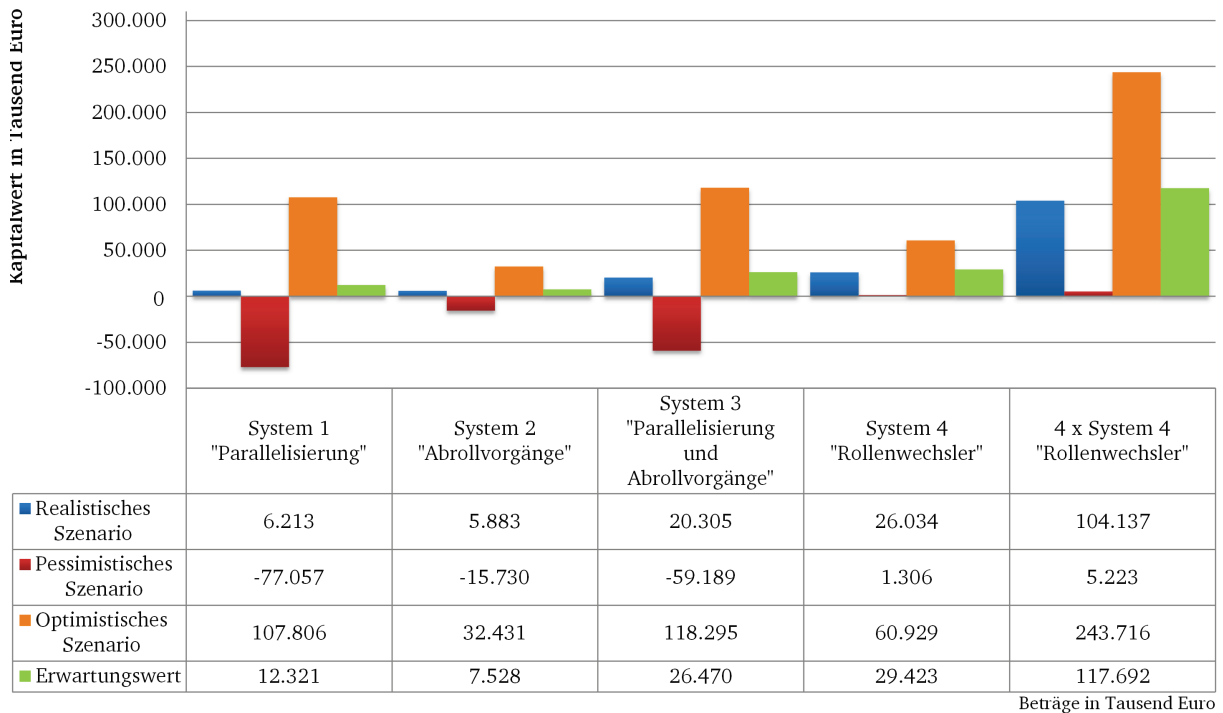


Abb. 6.2: Vergleich der Kapitalwerte sowie deren Erwartungswert über alle drei Szenarien aller sechs Produktionssysteme

Die Darstellung zeigt, dass die Produktionssysteme mit einem Rollenwechsler mit Abstand die niedrigsten Betriebskosten pro Quadratmeter aufweisen. Diese belaufen sich auf 0,13 €/m², während die Betriebskosten der anderen Systeme fast doppelt so hoch sind. Somit unterstützt dieses Ergebnis die Empfehlung, unter diesen Alternativen System 4 bzw. ein Vielfaches von System 4 zu wählen.

Tabelle 6.13: Betriebskosten der Varianten pro produzierten Quadratmeter Solarzelle für alle drei Szenarien

Beschreibung der Produktionssysteme				Durchsatz Substrat- rollen	Ge- schwin- digkeit	Fläche der Solarzellen	max. Leistung d. Solarzellen	Betriebskosten in Euro / m ²		
Variante	Optimierung durch	Abroll- einheiten	Druck- werke	pro Jahr	m/min	in km ² / Jahr	GWp / Jahr	Realistic Case	Worst Case	Best Case
System 1	Parallelisierung	17	17	8.046	n.a.	40,23	0,80	0,40 €	0,59 €	0,28 €
System 2	Abrollvorgänge	3	7	2.184	41,67	10,92	0,22	0,35 €	0,53 €	0,25 €
System 3	Parallelisierung & Abrollvorgänge	12	23	8.046	n.a.	40,23	0,80	0,36 €	0,55 €	0,26 €
System 4	Rollenwechsler	3	7	3.253	62,06	16,26	0,33	0,19 €	0,29 €	0,13 €
4 x System 4	4 x System 4 Rollenwechsler	12	28	13.011	62,06	65,06	1,30	0,19 €	0,29 €	0,13 €

6.2. Kooperation im Innovationsprozess

Wie bei der Darstellung des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik in Kapitel 5 beschrieben wurde, handelt es sich um einen sehr komplexen und iterativen Vorgang, bei dem die Zusammenarbeit vieler Fachdisziplinen notwendig ist. Da ein solcher Innovationsprozess zum einen mit hohen Kosten und zum anderen mit hohen Risiken verbunden ist, kann eine Zusammenarbeit in diesem Segment hilfreich sein, um die anfallen Kosten sowie das dabei auftretende Risiko zu teilen. In dem folgenden Abschnitt wird die Möglichkeit von Kooperation im Innovationsprozess der druckbaren Elektronik untersucht.

6.2.1. Grundlagen von Kooperationen

Für den Begriff Kooperationen gibt es zahlreiche Definitionen. Allen gemein ist, dass „zwischen den an einer Kooperation beteiligten Unternehmen eine Zweckbeziehung besteht, mit dem Ziel, betriebliche Aufgaben über „normale“ Marktbeziehungen hinaus zu ergänzen“. ⁶⁵¹ Ergänzend hierzu beschreibt Blohm: „Unter Kooperation wird eine, auf stillschweigenden oder vertraglichen Vereinbarungen beruhende Zusammenarbeit zwischen rechtlich selbständigen und in den nicht von der Zusammenarbeit betroffenen Bereichen auch wirtschaftlich nicht voneinander abhängigen Unternehmungen verstanden.“ ⁶⁵²

6.2.1.1. Ziele / Vorteile von Kooperationen

Für die Ziele von Kooperationen existieren viele Definitionen. Dabei steht die Frage im Mittelpunkt, warum Unternehmen eine Kooperation eingehen. Ebert (1998) reduziert alle Ziele auf das Erreichen von Synergieeffekten. ⁶⁵³ „Übertragen auf Kooperationen bedeutet dies, dass durch die Zusammenarbeit mehrerer Unternehmen auf ausgewählten Gebieten Vorteile erreicht werden können, die ein einzelnes Unternehmen alleine nicht in der Lage wäre zu erreichen.“ ⁶⁵⁴ Killich (2011) ergänzt, dass diese Vorteile durch eine „alleinige Vorgehensweise gar nicht oder nur in einem wesentlich längeren Zeitraum realisierbar wä-

⁶⁵¹ Hagenhoff (2004).

⁶⁵² Blohm (1980).

⁶⁵³ Ebert (1998).

⁶⁵⁴ Hagenhoff (2008).

ren“.⁶⁵⁵ Eine weitere Betrachtung haben Dyer und Singh (1998) mit der Relational View gebracht. Während die Resource Based View den Blickwinkel auf einer Unternehmung hat und die Industry Structure View den Blick auf die Industrie hat, untersucht die Relational View die an der Kooperation beteiligten Unternehmen. Dieser Sichtweise liegt die Annahme zu Grunde, dass die Kooperationspartner Wettbewerbsvorteile durch Kooperationen generieren können. Dabei spielen vier Aspekte eine Rolle:

- 1) Überbetriebliche Vermögenswerte
- 2) Plattform für Wissenstransfer
- 3) Komplementäre Ressourcen und Fähigkeiten
- 4) Effektive Steuerung (Governance)

Beispiele für überbetriebliche Vermögenswerte sind angepasste Maschinen oder Werkzeuge, gemeinsam optimierte Anlagen, sowie gemeinsam aufgebautes Knowhow bezüglich Prozessen, Maschinen oder Produkten. Eine gemeinsame Plattform für Wissenstransfer verhilft den beteiligten Unternehmen zu deutlich effektiverer Kommunikation und Wissenstransfer. Da Wissen nur schwer zu kopieren und transferieren ist, können dadurch gemeinsame Alleinstellungsmaßnahmen erarbeitet werden. Durch das Zusammenlegen von komplementären Ressourcen und Fähigkeiten der beteiligten Unternehmen, können zusammen neue Lösungen gefunden werden, die alleine nicht möglich sind. Dieser Effekt ist vor allem bei stark komplementären Fähigkeiten besonders ausgeprägt. Durch eine effektive Steuerung können die beteiligten Unternehmen zum einen ihre Überwachungs- und Transaktionskosten reduzieren, und zum anderen die ersten drei Aspekte stärken. Diese Aspekte stärken die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen und können dadurch die Renten der Unternehmen erhöhen.⁶⁵⁶

Eine weitere Möglichkeit ist die Einteilung der Vorteile in kostenorientierte sowie leistungs- bzw. marktorientierte Vorteile zu unterteilen.⁶⁵⁷ In einer Kooperation ergeben sich **kostenorientierte Vorteile** vor allem durch Skaleneffekte (Economies of Scale), Verbundeffekte (Economies of Scope) und durch das Teilen von Risiken. Größendegressionseffekte und Reichweiteneffekte ergeben sich

⁶⁵⁵ Killich (2011).

⁶⁵⁶ vgl. Dyer/Singh (1998).

⁶⁵⁷ vgl. Ebert (1998).

vor allem durch die gemeinsame Nutzung von Produktionsfaktoren.⁶⁵⁸ Das Teilen der Risiken ist besonders beim Tätigen großer Investitionen oder bei der Durchführung von Innovationsprojekten sinnvoll. Durch eine Kooperation kann der Aufwand und damit das Risiko des einzelnen Unternehmens gesenkt werden.⁶⁵⁹ „**Marktorientierte Vorteile** ergeben sich, wenn die Marktposition eines Unternehmens durch die Kooperation verbessert werden kann“. ⁶⁶⁰ Dies kann durch den Zugang zu wichtigem Know-how in Kooperationen geschehen, oder durch den Zugang zu kritischen Märkten und Kunden geschehen.⁶⁶¹

Ebert (1998) unterscheidet entlang der Wertschöpfungskette Input-Synergien, Prozess-Synergien und Output-Synergien. **Input-Synergien** treten im Vorfeld des Produktionsprozesses beispielsweise im Einkauf, Finanzierung, Forschung und Entwicklung oder der Ressourcensicherung auf. Die **Prozess-Synergien** treten im eigentlichen Produktionsprozess auf. Synergien entstehen beispielsweise durch Kostensenkungen in Produktion oder durch Kapazitätserweiterung. **Output-Synergien** treten nach dem Produktionsprozess auf und können durch Input- bzw. Prozess-Synergien bedingt sein. Beispiele sind Ausdehnung des Marktanteils oder Verbesserung der Rentabilität.⁶⁶² (vgl. Tabelle 6.14).

Tabelle 6.14: Ziele und Vorteile von Kooperationen
Quelle: In Anlehnung an Hagenhoff (2004)

	Input-Synergien	Prozess-Synergien	Output-Synergien
Kostenorientierte Vorteile	Kostenreduktion durch effizientere Leistungsbereitstellung	Kostenreduktion durch effizientere Leistungserstellung	Kostenreduktion durch effizienteren Absatz der erstellten Leistung
Marktorientierte Vorteile	Zugang zu - Beschaffungsmärkten - Zugang zu Ressourcen - Zugang zu Know-how	Ergänzung des Produkt oder Leistungsspektrums	Zugang zu Absatzmärkten

Um die hier genannten Vorteile von Kooperationen nutzen zu können, sind allerdings Anstrengungen notwendig, damit solche Kooperationen erfolgreich verlaufen. So sind beispielsweise Abstimmungs-, Planungs- und Steuerungsaktivitäten notwendig. Außerdem sind auch Kooperationen mit Risiken behaftet,

⁶⁵⁸ vgl. Hagenhoff (2008).

⁶⁵⁹ vgl. Gahl (1991).

⁶⁶⁰ Hagenhoff (2008).

⁶⁶¹ vgl. Baba/Imai (1990).

⁶⁶² vgl. Ebert (1998).

wenn etwa einer „der Partner ‚nur‘ seinen eigenen kurzfristigen Vorteil aus der Kooperation zieht und beispielsweise die Kooperation nach Erreichung seines Zieles vorzeitig beendet, unabhängig davon, welche weiteren Kooperationsaktivitäten noch geplant waren“.⁶⁶³ Untersuchungen über die Beweggründe von Unternehmen Kooperationen einzugehen zeigen, dass Unternehmen überwiegend an marktorientierten Vorteilen interessiert sind, und weniger an kostenorientierten Vorteilen.⁶⁶⁴ Dies ist vor allem bei neuen Technologien relevant, da diese eine Mischung von mehreren komplementären Fähigkeiten erfordern, welche niemals in einer einzigen Unternehmung komplett vorhanden sind.⁶⁶⁵ Fischer beschreibt, dass vor allem die folgenden Ziele beim Eingehen einer Kooperation wichtig sind:

- 1) Reduktion der Innovationszeit (schnellere Marktreife, Reduktion der Innovationsentwicklungszeit, schnellerer Ressourcenzugang,)
- 2) Kostensenkung und Risikominimierung (Teilung von Kosten, Verteilung von Risiken und Unsicherheit), Ressourcenzugang und Kompetenzgewinn (Know-how- und Ressourcen-Entwicklung, schnellerer Aufbau von fehlenden Ressourcen)
- 3) Verbesserung der Wettbewerbsposition (Zugang zu neuen Märkten, Erhöhung der Erfolgsaussichten der Innovation, Aufbau von Markteintrittsbarrieren)
- 4) Verstärkung der Partnerbindung.⁶⁶⁶
- 5) Aufbau von kooperationspezifischer Vermögenswerte

Für eine weitere Betrachtung von Motiven zum Eingehen einer Kooperation siehe Hauschild und Salomo (2011).⁶⁶⁷

6.2.1.2. Kooperationsformen

Generell muss zwischen innerbetrieblichen, zwischenbetrieblichen und überbetrieblichen⁶⁶⁸ Kooperation unterschieden werden. Im folgenden Abschnitt wird

⁶⁶³ Killich (2011). Erklärung kann in diesem Fall die Prinzipal-Agent-Theorie geben, da einer der beiden Partner einen Wissensvorsprung hat und diesen für seinen Vorteil nutzt.

⁶⁶⁴ vgl. Hagedoorn/Schakenraad (1990); Freeman (1991).

⁶⁶⁵ vgl. DeBresson/Amesse (1991).

⁶⁶⁶ vgl. Fischer (2006).

⁶⁶⁷ vgl. Hauschildt/Salomo (2011).

⁶⁶⁸ Überbetriebliche Kooperationen erstellen keine am Markt verwertbaren Leistungen, wie beispielsweise Industrie- und Handelskammern. vgl. Hagenhoff (2004).

nur die zwischenbetriebliche Kooperation näher betrachtet. Die zwischenbetriebliche Kooperation kann dabei als Alternative zu dem Fremdbezug oder der Eigenerstellung gesehen werden. Unternehmen haben zum einen die Option, die notwendige Leistung am freien Markt zuzukaufen. Zum anderen kann die Leistung auch alleine im Unternehmen erbracht werden. Dies setzt allerdings voraus, dass die dazu erforderlichen Kompetenzen und das erforderliche Know-how im eigenen Unternehmen verfügbar sind, oder neu aufgebaut werden können.⁶⁶⁹ Die Vielfalt an Alternativen zwischen dem Fremdbezug und der Eigenerstellung ist aufgrund vieler verschiedener Kooperationsformen sehr groß. Abb. 6.3 zeigt die möglichen Kooperationsformen zwischen Fremdbezug und Eigenerstellung. Im Gegensatz zu Killich (2011) wird allerdings die jeweilige Grenze zu Fremdbezug bzw. Eigenfertigung anders zugeordnet. So scheint gerade bei einem Fremdbezug oder einer losen Partnerschaft wie der Interessensgemeinschaft die Zusammenarbeit jederzeit und einseitig kündbar. Im Gegensatz zu einem Joint Venture oder einer strategischen Allianz. Hierbei handelt es sich um eine bewusste und explizit vereinbarte Zusammenarbeit. Killich ordnet diese Grenzen umgekehrt zu.

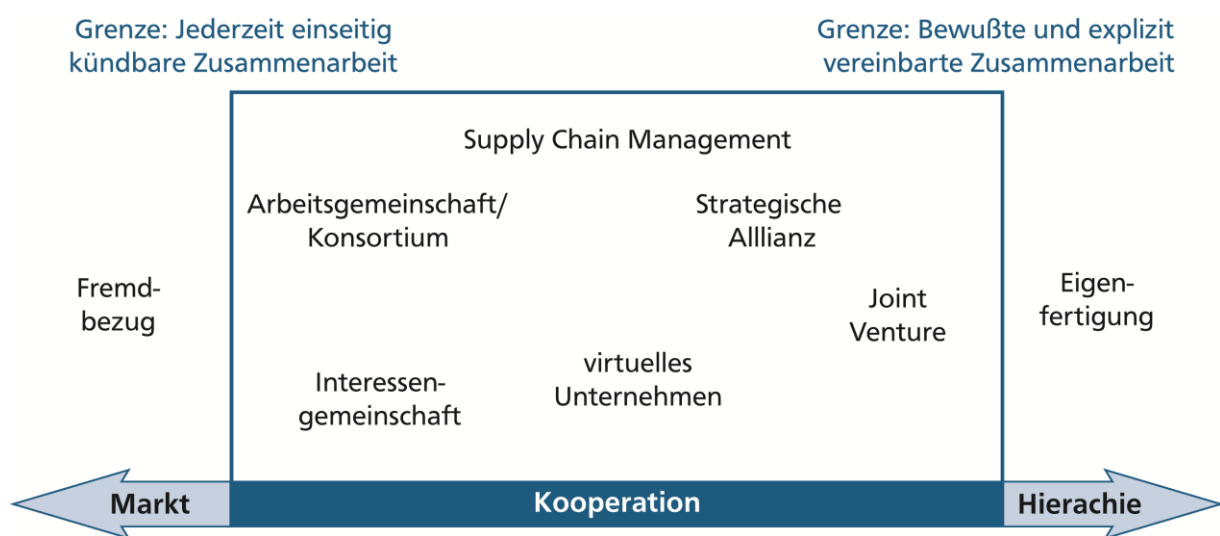


Abb. 6.3: Zwischenbetriebliche Kooperation als alternative Organisationsform
Quelle: In Anlehnung an Killich (2011)

Es gibt viele Arten von zwischenbetrieblichen Kooperationen, die sich in vielen Kriterien unterscheiden. So werden Kooperationen nach dem Zeithorizont und der zeitlichen Begrenzung unterschieden. Kooperationen kurz- oder langfristig angelegt sein sowie zeitlich begrenzt sein. Eine zeitliche Begrenzung erfordert auch eine sachlich Begrenzung, beispielsweise auf einen Auftrag oder eine ge-

⁶⁶⁹ vgl. Killich (2011).

meinsame Entwicklung. Der Formalisierungsgrad beschreibt das Vorgehen, wie Unternehmen die Verknüpfung von Funktionen durchführen und auf welche Art sie es vereinbaren. Dies kann beispielsweise über mündliche Absprachen oder durch Verträge geschehen. Darüber hinaus ist wichtig, wie viele Partner an dieser Kooperation beteiligt sind.⁶⁷⁰ Die Intensität von Kooperation lässt sich anhand von dem Zeithorizont und dem Formalisierungsgrad beurteilen.⁶⁷¹ Tabelle 6.15 fasst diese Kriterien und die möglichen Ausprägungen übersichtlich in einem morphologischen Kasten zusammen.

Tabelle 6.15: Morphologischer Kasten mit den Unterscheidungsmerkmalen für Kooperationsformen
Quelle: In Anlehnung an Hagenhoff (2008)

Merkmal	Ausprägung		
	langfristig	mittelfristig	kurzfristig
Zeithorizont			
Zeitliche Begrenzung	unbegrenzt (dauerhaft)		begrenzt
Sachliche Begrenzung	unbegrenzt		begrenzt
Funktions-verknüpfung	Zusammenlegung von Funktionen in Gemeinschaftsunternehmen		Abstimmung von Funktionen
Fixieren von Absprachen	explizit (Verträge)	Spielregeln/Normen	implizit (Mündliche Absprachen)
Min. Anzahl der Partner	2		3
Typische max. Anzahl der Partner	bis zu 5	bis zu 10	mehr als 10

Killich beschreibt über die hier aufgeführten Kriterien noch weitere: Richtung und Ausdehnung der Kooperation, sowie die Zielidentität der Partner und die darin einbezogenen Abteilungen.⁶⁷² Aus den vielen möglichen Kooperationsformen lassen sich drei Grundtypen eindeutig beschreiben: Joint-Venture, Strategische Allianz und Unternehmensnetzwerk.⁶⁷³

⁶⁷⁰ vgl. Hagenhoff (2004).

⁶⁷¹ vgl. Bronder/Pritzl (1991).

⁶⁷² vgl. Killich (2011).

⁶⁷³ vgl. Hagenhoff (2008).

6.2.2. Kooperationen in der druckbaren Elektronik

Bis heute gibt es nur einige wenige Produkte der druckbaren Elektronik auf dem Markt. Aus den vielen guten Produktideen in diesem Umfeld konnten noch nicht viele als erfolgreiche Produkte auf dem Markt platziert werden. Wie in Kapitel 3 beschrieben, müssen hierfür noch viele Zusammenhänge erforscht werden. Wie Dörsam (2010) und Schnell (2011) berichten, stellt vor allem die starke Abhängigkeit mehrerer Variablen voneinander eine sehr große Herausforderung dar.

Wie in Abb. 6.4 dargestellt, sind die zu optimierenden Größen das Device-Layout, das Material und dessen Formulierung sowie der dazugehörige Prozess. Eine Änderung an einer bestimmten Stelle kann einen Einfluss an einer anderen Stelle haben. Daher müssen mehrere voneinander abhängige Variablen gleichzeitig optimiert werden, welches einen sehr stark iterativen Forschungsprozess bedingt. Um diese Prozesse parallel zu optimieren, bedarf es Kompetenzen in allen erwähnten Bereichen: Device-Layout, Material und Formulierung sowie Prozess und Anlagenbau. Die Bereiche sind recht unterschiedlich, so dass es nur wenige Unternehmen gibt, die all diese Kompetenzen abdecken können. Anknüpfend an die Relational View von Dyer und Singh (1998), können betroffenen Unternehmen durch das Zusammenlegen komplementärer Ressourcen stark voneinander profitieren, und so Kosten wie Risiken dieser Entwicklung teilen. Auch die Praxis zeigt, dass Unternehmen in dem Umfeld der druckbaren Elektronik mit Partnern zusammenarbeiten. So hat der Branchenverband OE-A bereits mehr als 200 Mitglieder.⁶⁷⁴ Viele Unternehmen wählen die zeitlich begrenzte Zusammenarbeit über öffentlich geförderte Forschungsprojekte wie beispielsweise EU- oder BMBF-Projekte. Darüber hinaus ist in den letzten Jahren zu beobachten, dass mehrere Forschungsnetzwerke im Umfeld der druckbaren Elektronik entstanden sind. Beispiele hierfür sind unter anderem das Holst Centre in Eindhoven, die InnovationLAB in Heidelberg, VTT Technical Research Center of Finland oder das Netzwerk Organic Electronic Saxony.

⁶⁷⁴ OE-A steht Organic Electronic Association. vgl. OE-A (2012).

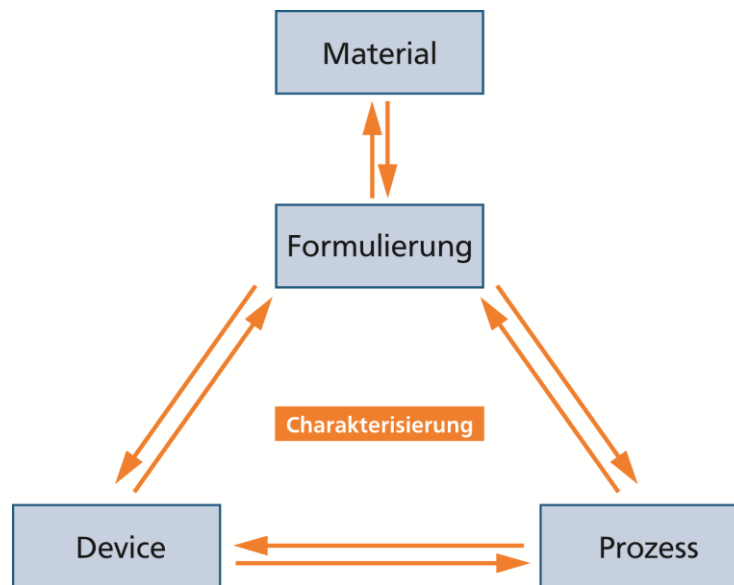


Abb. 6.4: Multi-Level-Ansatz zur Entwicklung von funktionalen Devices
Quelle: In Anlehnung an Dörsam (2010)

Durch solche Netzwerke können die beteiligten Unternehmen Ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern. Neben dem Zusammenlegen ihrer komplementären Ressourcen, können auch die anderen drei Aspekte der Relational View von Dyer und Singh (1998) realisiert werden. So bilden diese Netzwerke mit zentraler Forschungs- und Wirkungsstädte eine gute Plattform zum Wissenstransfer. An diesen Forschungseinrichtungen wurden und werden überbetriebliche Vermögenswerte geschaffen. Das sind beispielsweise gemeinsame Forschungslabore mit Reinraum, Forschungsequipment oder auch der Aufbau von gemeinsamen Knowhow.

Schließlich kann festgehalten werden, dass Kooperationen in dem starken interdisziplinären Umfeld der druckbaren Elektronik große Vorteile generieren, die sich mittelfristig zu wichtigen Wettbewerbsvorteilen entwickeln können. So sieht auch der acatech-Bericht Nr. 6 über die „organische Elektronik in Deutschland“ Kooperation in Form von Netzwerken als zentralen Bestandteil für den Wettstreit um die zukünftigen Märkte der druckbaren Elektronik. Die zentralen Herausforderungen der druckbaren Elektronik wie Schaffen von Standards, Upscaling, Produktion und Qualitätssicherung sind nur durch Wertschöpfungsstufen übergreifende Zusammenarbeit lösbar. Eine wichtige Maßnahme ist das

Bereitstellen von Pilotanlagen, die so aber nur in größeren Forschungsverbünden realisiert und betrieben werden können.⁶⁷⁵

„Diese Forschungszentren erhöhen Innovationsgeschwindigkeit, können die Vernetzung im Inland und mit dem Ausland herstellen sowie den Nachwuchs fördern. Zunächst sind an Zentren durch integrative Zusammenarbeit unter exzellenten Rahmenbedingungen und durch intensiven fachlichen Austausch die Voraussetzungen für hoch qualitative Forschung und Entwicklung gegeben. Als einer der größten Vorteile bei der Produktentstehung gilt die örtliche Nähe aller Know-how-Träger. Die Vereinigung von Kompetenzen verschiedener Wertschöpfungsstufen aus Wissenschaft und Wirtschaft „unter einem Dach“ mit Anbindung an eine exzellente Infrastruktur ist daher ein wesentlicher Vorteil von Zentren.“⁶⁷⁶ Die Autoren heben das Netzwerk um das Holst Centre in Eindhoven als Leuchtturm hervor. So sehen auch Rikkola/Korhonen (2011) in zentralen Forschungseinrichtungen mit gemeinsamen Laboren eine gute Plattform zum Wissenstransfer und einen zentralen Punkt für die Gründung und Unterstützung von neuen Unternehmen.⁶⁷⁷

⁶⁷⁵ vgl. Schnell (2011).

⁶⁷⁶ Schnell (2011).

⁶⁷⁷ vgl. Rikkola/Korhonen (2011).

7. Schlussbetrachtung

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stand die Fragestellung, welche Einflussfaktoren die Produktion von druckbarer Elektronik bestimmen. Diese Frage wurde im Zusammenhang des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik untersucht. Eine wissenschaftliche Untersuchung der Produktion und des Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik wurde bisher nicht durchgeführt, so dass mit der vorliegenden Arbeit diese Forschungslücke bearbeitet wurde. Ziel dieser Arbeit war, diese Frage sowohl aus theoretischer Sicht als auch mit Blick auf die Praxis zu untersuchen. Diese Arbeit nähert sich der Thematik von einer Seite, die sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte aggregiert betrachtet. Der zukünftige Erfolg der druckbaren Elektronik hängt davon ab, ob die vielen Produktideen in eine erfolgreiche Produktion überführt werden können.

Hier setzte diese Arbeit an und analysierte zum einen die technischen Zusammenhänge, die für eine solche Produktion notwendig sind und setzte diese in einen wirtschaftlichen Zusammenhang. Diese technische Analyse soll nicht Selbstzweck sein, sondern wurde in den Innovationsprozess eingebunden, so dass aus dem Innovationsprozess die Ziele für eine wirtschaftlich erfolgreiche Produktion abgeleitet werden können. Somit kann die folgende Problemstellung bearbeitet werden:

Wie muss der Übergang von technischen Konzepten und Machbarkeitsstudien hin zu einer wirtschaftlich tragfähigen Produktion gestaltet werden, damit druckbare Elektronik erfolgreich am Markt platziert werden kann?

Unter Verwendung von technischen und wirtschaftlichen Ansätzen, verfolgte diese Arbeit daher wissenschaftliche und auch praxisorientierte Ziele:

- 1) Abgrenzung des Begriffsapparats (deskriptives Wissenschaftsziel),
- 2) Analyse der Zusammenhänge von Produktion von druckbarer Elektronik (theoretisches Ziel)
- 3) Entwicklung von Gestaltungsempfehlungen und eines Leitfadens auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse (pragmatisches Ziel).

7.1. Zusammenfassung der Erkenntnisse

In **Kapitel 2** wurden die Begriffe zur Produktion von druckbarer Elektronik abgegrenzt. Zunächst wurde der Begriff der druckbaren Elektronik definiert und beschrieben. Darauffolgend wurden die drei Haupt-Applikationen der druckbaren Elektronik OPV, OLED und OFET definiert und im Detail beschrieben. Ergänzt wurden weitere Applikationen der druckbaren Elektronik wie Sensoren, anorganische Elektrolumineszenz, leitende Strukturen, Batterien und Smart Labels.

Danach wurde ein Überblick über die technischen Grundzüge erarbeitet. Hierfür wurde erstmalig für die Fertigungsverfahren der druckbaren Elektronik eine Systematisierung der Verfahren erarbeitet. So lassen sich die Verfahren wie folgt unterscheiden: Gliederung nach dem Umgebungsdruck, dem Aggregatzustand des zu verarbeitenden Materials, der Art der Materialdosierung, dem Zusammenhalt, der Community, der Auflösung, der Fläche, der Schichtdicke sowie nach der Produktivität. Darauffolgend wurden Fertigungsverfahren für die druckbare Elektronik identifiziert, wovon die wichtigsten (Tiefdruck, Flexodruck und Siebdruck) in Bezug auf die Produktion druckbarer Elektronik beschrieben wurden. Ergänzend wurden die folgenden Charakteristiken funktionaler Schichten definiert und beschrieben: Schichtdicke, Oberflächenrauigkeit, Kantenschärfe, Minimale Strukturgröße, Minimale Linienbreite ohne Unterbrechung, Register – Positionsgenauigkeit und Verunreinigung. Im Folgenden wurde ein Überblick über die wirtschaftlichen Grundzüge erarbeitet. Hierfür wurden zunächst die Grundlagen zur Produktion und Produktionskennzahlen im Hinblick auf die Produktion druckbarer Elektronik beschrieben. Abgeschlossen wurde dieser Teil mit den Grundlagen zur Wirtschaftlichkeit bzw. zur Beurteilung von Investitionsalternativen.

Dieses Begriffsgerüst bildet die Grundlage für die in **Kapitel 3** durchgeführte Analyse der kritischen Parameter zum Aufbau einer Produktion. Es wurde eine grundlegende Klassifikation der kritischen Parameter zum Aufbau einer Produktion druckbarer Elektronik erarbeitet. Damit gilt es, die Diskussion um die druckbare Elektronik mit Hinblick auf die künftigen Herausforderungen, die ein Upscaling mit sich bringt, zu strukturieren. Hierfür wurde zunächst, stellvertretend für die Produktion druckbarer Elektronik, der Fertigungsprozess von organischer Photovoltaik in möglichst allgemeiner Form dargestellt. Hierfür wurden vier Teilprozesse definiert: 1. Teilprozess: Vorbehandlung der zu bedruckenden

Oberfläche, 2. Teilprozess: Applizieren der funktionalen Schichten, 3. Teilprozess: Nachbehandlung und 4. Teilprozess: Verkapselung. Dieser Prozess wurde mit, aus der Literatur entnommenen, Erkenntnissen über Laborprozesse im Detail beschrieben. Auf dieser Darstellung aufbauend, wurden die kritischen Parameter zum Aufbau einer Produktion druckbarer Elektronik hergeleitet und beschrieben. Die Parameter wurden in vier Kategorien eingeteilt: Parameter des Device-Layouts, der Funktionsmaterialien und der Substrate sowie sonstige Parameter. Um die wichtigsten Parameter identifizieren zu können, wurden diese zunächst bewertet. Die relevanten Parameter wurden einer technischen und wirtschaftlichen Analyse unterzogen, aus der Hypothesen abgeleitet wurden. Danach wurden die drei wichtigsten Parameter der Produktionsplanung für die druckbare Elektronik identifiziert: Auswahl der Fertigungsverfahren, Auswahl der Substrattransportmethode sowie Anordnung der ausgewählten Bearbeitungsstationen zu einem Produktionssystem.

Für diese drei Parameter wurden in **Kapitel 4** Lösungsansätze erarbeitet. Als Vorbereitung der Analyse der kritischen Parameter der Produktionsplanung, wurde zu Beginn des Kapitels erstmals eine Systematik hergeleitet, welche grundlegend jede Art von substratbasierter Produktion charakterisiert. Folgende sechs Komponenten wurden im Detail diskutiert: Fertigungstechnologien, Kontakt-Geometrie, Substrattransportmethode, Substratbewegung, Substratzuführung und Integrationsgrad. In Kapitel 4.2 wurde erstmals eine Systematik zur Auswahl eines Fertigungsverfahrens für die druckbare Elektronik erarbeitet. Hierfür wurden Bewertungskriterien für die Auswahl identifiziert und im Detail beschrieben. Als Ergebnis konnte ein iterativer Ablaufplan sowie eine Matrix mit den notwendigen Bewertungskriterien von ausgewählten Fertigungsverfahren erstellt werden. Diese beiden Hilfsmittel können als Leitfaden für die Praxis dienen. Im zweiten Abschnitt wurde der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Produktion für vakuum-basierte und vakuumlose Verfahren untersucht. In Kapitel 4.3 wurde der Einfluss der Substrattransportmethode auf die Produktion untersucht. Hierfür wurden erstmals vier mögliche Substrattransportmethoden klassifiziert und im Detail beschrieben. Danach wurden 19 Charakteristiken des Substrattransports mit fünf Oberkriterien erarbeitet, anhand derer ein Auswahlprozess bezüglich einer Substrattransportmethode durchgeführt werden kann. Kapitel 4.4 beschreibt den Einfluss der Struktur eines Produktionssystems auf die Auslegung einer Produktionsanlage. Hierfür wurden unterschiedliche Lösungen zur Anordnung von Bearbeitungseinheiten zu einem op-

timalen Produktionssystem analysiert und optimiert. Dabei wurden die Produktionssysteme nach der Zeit, nach der Qualität und nach dem Zeitpunkt der Vereinzelung untersucht. Im letzten Abschnitt wurden die Besonderheiten des Handlings von Substraten in einer Produktion beschrieben.

In **Kapitel 5** wurden die Erkenntnisse aller vorausgehenden Abschnitte zusammengeführt. So wurden die in Kapitel 3 analysierten Einflussparameter sowie die Ergebnisse der detaillierten Untersuchungen der wichtigsten Einflussparameter aus Kapitel 4 eingebunden. Darauf aufbauend wurde der aus der Literatur im Detail dargestellte Innovationsprozess, auf die druckbare Elektronik adaptiert. Der Innovationsprozess wurde in die folgenden fünf Phasen eingeteilt, die auf dem Weg von der Idee bis zur Produktion durchlaufen werden müssen: Produktplanungsphase, Produktentwicklungsphase, Produktionssystemphase, Produktionsplanungsphase und Umsetzungsphase. Abb. 7.1 zeigt den Innovationsprozess der druckbaren Elektronik mit seinen fünf Phasen, der alle Erkenntnisse dieser Arbeit zusammenfasst.

Mit den Erkenntnissen aus den Kapiteln 3 und 4 wurde eine Vorgehensweise entwickelt, welche für den allgemeinen Lösungsprozess eines Innovationsprozesses der druckbaren Elektronik angewendet werden kann. Die entwickelte Vorgehensweise hat einen sehr iterativen Charakter und ist daher als operative Handlungsempfehlung aufzufassen, die der Logik des hier notwendigen Handelns und der schrittweisen Lösungsentwicklung folgt. Damit wurde einerseits ein Leitfaden für die Unternehmenspraxis erarbeitet, der Unternehmen die Möglichkeit bietet, ihre Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu strukturieren und ein umfassendes Bild der Einflussfaktoren und möglicher Problemfelder zu erarbeiten. Dabei gilt es den Innovationsprozess zu überarbeiten und auf die jeweilige Situation anzupassen. Andererseits dient diese Darstellung der theoretischen Diskussion, indem sie einen Beitrag zur Begriffsbildung und Strukturierung für den Innovationsprozess und speziell für die Produktion von druckbarer Elektronik leistet.

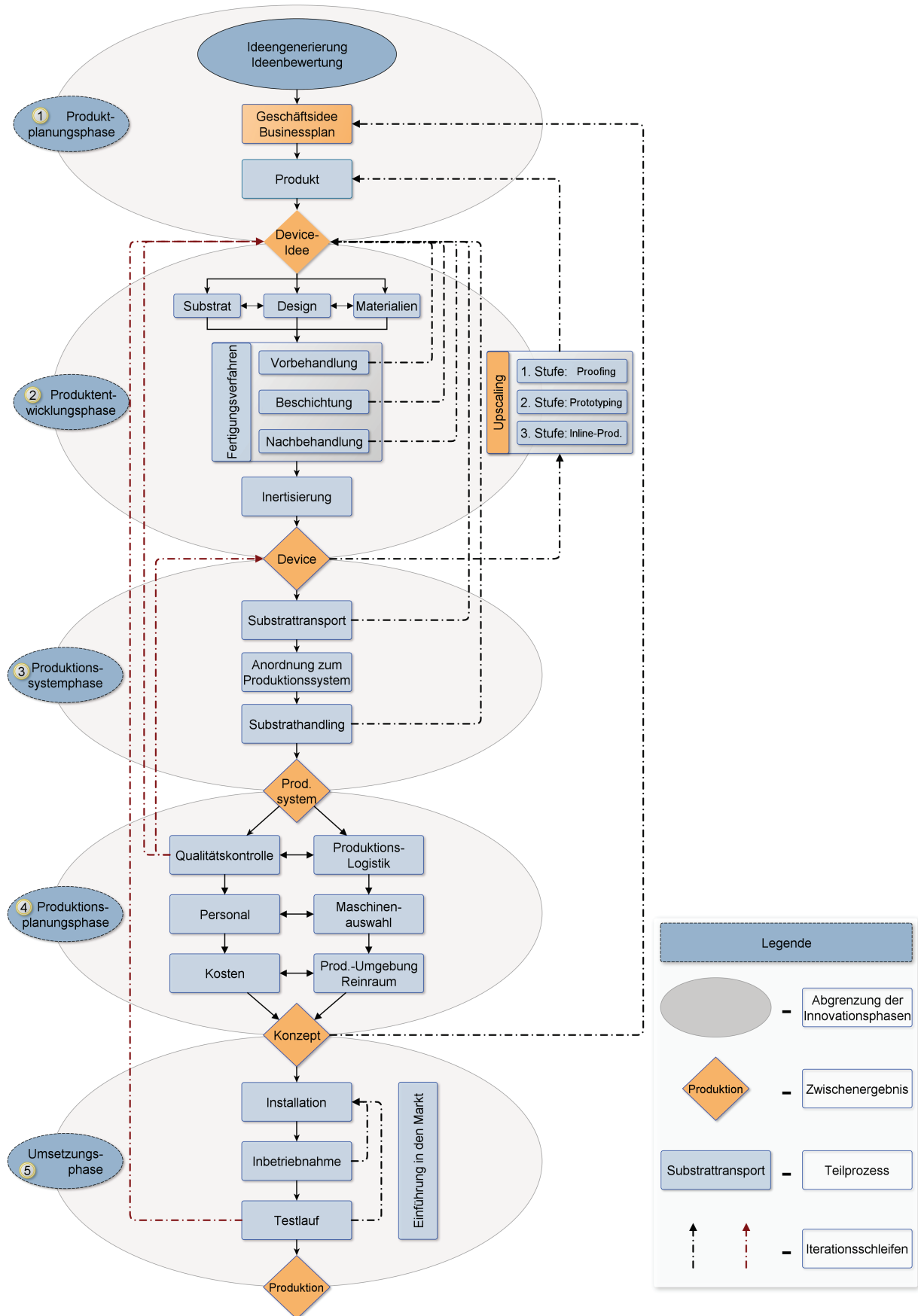


Abb. 7.1: Die fünf Phasen des Innovationsprozesses von druckbarer Elektronik

In **Kapitel 6** wurde der Innovationsprozess unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet. Hierfür wurden die fünf in Kapitel 4.4 erarbeiteten Produktionssysteme einer Wirtschaftlichkeitsanalyse unterzogen. Damit konnte gezeigt werden, dass eine rein technische Betrachtung nicht zielführend ist. So konnte beim Vergleich der Kapitalwerte der vier Systeme gezeigt werden, dass nur das System 4 mit Rollenwechsler in allen drei angenommen Szenarien einen positiven Kapitalwert erreicht, obgleich alle untersuchten Produktionssysteme einen positiven Erwartungswert aggregiert über alle drei Szenarien haben. So konnte auf Basis technischer Informationen ein wirtschaftlich sinnvolles Ergebnis erarbeitet werden.

Im zweiten Abschnitt wurden die Vorteile von Kooperationen in Innovationsprozessen erarbeitet und diese auf die druckbare Elektronik übertragen. Wie der Innovationsprozess der druckbaren Elektronik zeigt, handelt es sich dabei um einen sehr komplexen und iterativen Vorgang, bei dem die Zusammenarbeit vieler Fachdisziplinen notwendig ist. Eine Kooperation kann diesen Aspekt entschärfen, insofern mit Unternehmen mit den notwendigen Knowhow zusammengearbeitet wird. Da ein solcher Innovationsprozess zum einen mit hohen Kosten und zum anderen mit hohen Risiken verbunden ist, kann eine Zusammenarbeit in diesem Segment hilfreich sein, um die anfallen Kosten sowie das dabei auftretende Risiko zu teilen. Neben der Kostensenkung und Risikominimierung, können beteiligte Unternehmen mit Kooperationen weitere Vorteile generieren: Reduktion der Innovationszeit, was zu einer schnelleren Marktreife führen kann, was wiederum zu einer Verbesserung der Wettbewerbsposition führen wird.

7.2. Ausblick

In diesem Abschnitt werden zunächst die Handlungsimplicationen für die Praxis beschrieben. Zum Schluss werden die Ansatzpunkte für weitere Forschungsbemühungen vorgestellt.

Handlungsimplicationen für die Praxis:

Der in Abb. 7.1 vorgestellte Innovationsprozess leitet in fünf Phasen den Weg von einer Produktidee bis zur Produktion von druckbarer Elektronik. Damit wurde ein Leitfaden für die Unternehmenspraxis erarbeitet, der Unternehmen die Möglichkeit bietet, ihre Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu strukturieren und ein umfassendes Bild der Einflussfaktoren und möglicher Problem-

felder zu erarbeiten. Dabei gilt es den Innovationsprozess zu überarbeiten und auf die jeweilige Situation anzupassen. Die entwickelte Vorgehensweise hat einen sehr iterativen Charakter und ist daher als operative Handlungsempfehlungen aufzufassen, die der Logik des hier notwendigen Handelns und der schrittweisen Lösungsentwicklung folgen. Sie ist zwar vom Ablauf her sequenziell anzusehen, muss aber an die jeweilige Situation flexibel angepasst werden. Die in Kapitel 4 entwickelten Detaillösungen für die Auswahl von Fertigungsverfahren und von Substrattransportmethoden sowie zur Gestaltung eines optimalen Produktionssystems sind Untersysteme des dargestellten Leitfadens.

Ansatzpunkte für weitere Forschungsbemühungen:

Diese Arbeit liefert erste Antworten für den Innovationsprozess und betrachtet als Schwerpunkt die Produktion von druckbarer Elektronik. Hinter allen Antworten dieser Arbeit entstehen wieder neue Forschungsfragen. So soll diese Arbeit weniger als abschließendes Werk verstanden werden, sondern vielmehr als Startpunkt für die Erforschung des Innovationsprozesses und Produktionsprozesses der druckbaren Elektronik. Wissenschaftliches Arbeiten kann nur innerhalb festgelegter Grenzen erfolgen. Auch die vorliegende Arbeit unterlag an verschiedenen Stellen spezifischen Prämissen und Einschränkungen. So legt diese Arbeit den Schwerpunkt auf Druckverfahren. Eine intensive Betrachtung der Coating- und Aufdampfverfahren und vor allem die Kombination aus den Verfahren in einem Produktionsprozess würde die gewonnen Ergebnisse ergänzen.

Die in Kapitel 3 analysierten kritischen Parameter zum Aufbau einer Produktion wurden aus der Theorie und praktischen Erfahrungen hergeleitet. Diese gilt es, im Detail weiter auf Vollständigkeit zu untersuchen und an realen Prozessen zu validieren.

Auch die Systematik substratbasierter Produktion wurde aus theoretischen und praktischen Erkenntnissen hergeleitet. Eine Validierung an Produktionsprozessen verschiedener Branchen steht noch aus. Das gleiche gilt für die Systematik zur Auswahl von Fertigungsverfahren. Auch diese sollten an realen Prozessen validiert und weiterentwickelt werden. Für die in dieser Untersuchung beschriebenen vier Substrattransportmethoden Roll-to-Roll, Sheet-to-Sheet, Roll-to-Sheets und Sheet-on-Shuttle sollten weitere technische und wirtschaftliche Untersuchungen durchgeführt werden, um die Transportmethoden optimal in dem jeweiligen Produktionsprozess druckbarer Elektronik einsetzen zu können. Die erarbeiteten Optimierungsmodelle für die Anordnung von Bearbei-

tungsstationen zu Produktionssystemen konnten in dieser Arbeit nicht in Versuchen oder an realen Produktionssystemen überprüft werden. Eine Anwendung auf reale Prozesse ohne geschätzte Zahlen scheint notwendig. Des Weiteren verspricht eine Übertragung der aus der Operation Research bekannten Optimierungsmodelle auf die Produktion druckbarer Elektronik weitere wichtige Erkenntnisse.

Eine Überprüfung des auf die druckbare Elektronik adaptierten Innovationsprozesses auf reale Prozesse scheint zunächst sehr schwierig, da Innovationsprozesse meist in langen Zeiträumen stattfinden. So gilt es, eine Möglichkeit zu finden, den beschriebenen Innovationsprozess für druckbare Elektronik zu überprüfen und weiterzuentwickeln.

Die in Kapitel 6 durchgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hilft bei der Investitionsentscheidung bezüglich der Produktionssysteme. Diese Betrachtung sollte soweit verallgemeinert werden, dass sie für alle notwendigen Entscheidungen im Innovationsprozess angewendet werden kann. Die Untersuchung im letzten Abschnitt über Kooperationen im Innovationsprozess zeigt das Potential von Kooperationen im Bereich der druckbaren Elektronik. Hier scheint eine Untersuchung von den bereits existierenden Kooperationen, vor allem in Form von großen Forschungsnetzwerken, weitere interessante Erkenntnisse über die Innovationsprozesse in der druckbaren Elektronik zu liefern. Auch sollte der Innovationsprozess vor dem Hintergrund der Open Innovation untersucht werden.

Die Auseinandersetzung mit dem Innovationsprozess und im Besonderen mit dem Produktionsprozess von druckbarer Elektronik in Wissenschaft und Praxis wird weiter an Relevanz zunehmen. Grund hierfür ist vor allem die Notwendigkeit, die vielen Produktideen in eine erfolgreiche Produktion überführen zu müssen. Umso wichtiger scheint daher ein tiefes Verständnis über die Innovationsprozesse in der druckbaren Elektronik und eine Weiterentwicklung der Laborprozesse hin zu industrialisierten Produktionsprozessen. In künftigen Forschungsarbeiten sollten der in dieser Arbeit entwickelte Innovationsprozess und die Erkenntnisse über die Produktion aufgegriffen und die Untersuchung über Innovationsprozesse und die Produktion in der druckbaren Elektronik fortgeführt werden.

8. Literaturverzeichnis

- Abad, E. u. a. (2009): RFID smart tag for traceability and cold chain monitoring of foods: Demonstration in an intercontinental fresh fish logistic chain. In: Journal of Food Engineering, 93(2009)4, S. 394–399.
- Acker, Isabel Jasmin (2011): Methoden der mehrstufigen Ablaufplanung in der Halbleiterindustrie. Springer, Wiesbaden 2011.
- Adam, Dieter (2010): Produktionstechnik für transparente, leitfähige, strukturierte Substrate auf Basis nanoskaligen Indium-Zinn-Oxids. Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes PROTCF. 2010.
- Akamatsu, Hideo/Inokuchi, Hiroo/Matsunaga, Yoshio (1954): Electrical Conductivity of the Perylene-Bromine Complex. In: Nature, 173(1954)4395, S. 168–169.
- Ameri, Tayebbeh u. a. (2009): Organic tandem solar cells: A review. In: Energy & Environmental Science, 2(2009)4, S. 347.
- Andriessen, Ronn (2012): Solliance OPV: Towards Low Cost, Efficient and Stable Organic Photovoltaic Modules. Presented at Sun Day 07.11.2012.
- Asdonk, J./Bredeweg, U./Kowol, U. (1991): Innovation als rekursiver Prozeß - Zur Theorie und Empirie der Technikgenese am Beispiel der Produktionstechnik. In: Zeitschrift für Soziologie, 20(1991)4, S. 290–304.
- Van Assche, Ferdie u. a. (2008): Thin-film barrier on foil for organic LED lamps. Presented at AIMCAL Fall Technical Conference. Myrtle Beach, 2008.

- Baba, Y./Imai, K. (1990): Systemic innovation and cross-border networks: the case of the evolution of the VCR systems. In: Schumpeter Society Conference on Entrepreneurship, Technological Innovation and Economic Growth, held at Airlie House, VA, USA. 1990, S. 3–5.
- Bae, Sukang u. a. (2010): Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. In: *Nature Nanotechnology*, 5(2010)8, S. 574–578.
- Bauer, Jürgen/Hayessen, Egbert (2009): 100 Produktionskennzahlen. 1. Aufl., Cometis Publishing, Wiesbaden 2009.
- Baykasoğlu, A. (2009): Quantifying machine flexibility. In: *International Journal of Production Research*, 47(2009)15, S. 4109–4123.
- Becker, Eike (2006): Technologien für organische Feldeffekttransistoren in der Displaytechnik. Cuvillier Verlag, Göttingen 2006.
- Becker, Hans Paul (2011): Investition und Finanzierung: Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft. Springer, Wiesbaden 2011.
- Behrendt, Siegfried u. a. (2008): Nachhaltigkeitsinnovationen in der Display-Industrie - Aktivierung von Umweltentlastungspotenzialen durch Akteurskooperationen in Innovationsprozessen der Display-Branche. Berlin 2008 (IZT - WerkstattBerichte).
- Beister, Günther u. a. (1995): Progress in large-area glass coatings by high-rate sputtering. In: *Surface and Coatings Technology*, 76–77, Part 2(1995)0, S. 776–785.
- Bergauer, A./Eisenmenger-Sittner, C. (2006): Physik und Technologie Dünner Schichten, Manuskript Wien (Zugriff am: 13.07.2012).
- Berggren, M./Richter-Dahlfors, A. (2007): Organic Bioelectronics. In: *Advanced Materials*, 19(2007)20, S. 3201–3213.
- Blankenburg, Lars u. a. (2009): Reel-to-reel wet coating as an efficient up-scaling technique for the production of bulk-heterojunction polymer solar cells. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(2009)4, S. 476–483.

- Blohm, H. (1980): Kooperation. In: Grochla, E. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation. Poeschel, Stuttgart 1980.
- Bornemann, N./Sauer, H. M/Dörsam, E. (2011): Gravure Printed Ultrathin Layers of Small-Molecule Semiconductors on Glass. In: Journal of Imaging Science and Technology, 55(2011), S. 040201.
- Bornemann, Nils u. a. (2011): Evaluation and Determination of Gravure Cylinders for Functional Printing. Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C) Frankfurt am Main 2011.
- Bornemann, Nils (2012): From Graphical to Functional Gravure Printing: A Discussion of Several Issues. Presented at InnovationLAB GmbH Heidelberg 12.10.2012
- Bornemann, Nils/Sauer, Hans Martin/Dörsam, Edgar (2012): Experimental Investigation of the Filling and Emptying of Gravure Cells. Presented at Materials Science Engineering (MSE) Darmstadt 2012.
- Boysen, Nils (2005): Variantenfließfertigung. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden 2005.
- Braam, Kyle T./Volkman, Steven K./Subramanian, Vivek (2012): Characterization and optimization of a printed, primary silver–zinc battery. In: Journal of Power Sources, 199(2012), S. 367–372.
- Brabec, C. J/Dyakonov, V./Scherf, U. (2008): Organic photovoltaics: materials, device physics, and manufacturing technologies. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2008.
- Brabec, C. J. u. a. (2005): Production Aspects of Organic Photovoltaics and Their Impact on the Commercialization of Devices. In: MRS BULLETIN, 30(2005), S. 51.
- Bräuer, G. (1999): Large area glass coating. In: Surface and Coatings Technology, 112(1999)1–3, S. 358–365.
- Brazis, Paul u. a. (2008): Patterning Techniques for Solution Deposition. In: Mitzi, David B. (Hrsg.): Solution Processing of Inorganic Materials. John Wiley & Sons, New Jersey 2008, S. 379–406.

- Brethour, J. M. (2001): Filling and Emptying of Gravure Cells-A CFD Analysis. Presented at 4th European Coating Symposium Brussels, Belgium 2001.
- Brezesinski, G./Mögel, H. J. (1993): Grenzflächen und Kolloide - Physikalisch-chemische Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1993.
- Bronder, C./Pritzl, R. (1991): Leitfaden für strategische Allianzen. In: Harvard Business Manager, 13(1991)1, S. 44–53.
- Brungs, Felix (2012): Der Milkrun in der Produktionslogistik. Dissertation. Shaker, Aachen.
- Brunner, Franz J. (2008): Japanische Erfolgskonzepte: KAIZEN, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance, Shopfloor Management, Toyota Production Management. Hanser Verlag, München 2008.
- Brutting, W./Rieß, W. (2008): Grundlagen der organischen Halbleiter. In: Physik Journal, 7(2008)5, S. 33.
- Bunshah, R. F. (2001): Handbook of hard coatings: deposition technologies, properties and applications. William Andrew, Norwich 2001.
- BVDM (Hrsg.) (2004): Kosten- und Leistungsgrundlagen für Klein- und Mittelbetriebe in der Druck- und Medienindustrie. Bundesverband Druck und Medien e.V, Wiesbaden 2004.
- Chan, Maggie Mei-Yee/Tao, Chi-Hang/Yam, Vivian Wing-Wah (2010): Overview and Highlights of WOLEDs and Organic Solar Cells: From Research to Applications. In: Yam, Vivian W. W. (Hrsg.): WOLEDs and Organic Photovoltaics, S. 1–35. Springer, Heidelberg 2010
- Chen, Robert H. (2011): Liquid Crystal Displays: Fundamental Physics and Technology. John Wiley & Sons, New Jersey 2011.
- Cherrington, Martyn u. a. (2011): Ultrafast near-infrared sintering of a slot-die coated nano-silver conducting ink. In: Journal of Materials Chemistry, 21 (2011) S. 7562-7564.

- Clemens, Wolfgang u. a. (2011): OE-A Roadmap for Organic and Printed Electronics, 4th edition OE-A (Hrsg.)
- Coenenberg, Adolf G./Fischer, Thomas M./Günther, Thomas (2007): Kostenrechnung und Kostenanalyse. Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2007.
- Colegrove, Jenifer (2009): Emerging display technologies lead the industry growth. Presentet at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C) Frankfurt am Main 2009.
- Cooper, Robert G. (1988): Predevelopment activities determine new product success. In: Industrial Marketing Management, 17(1988)3, S. 237–247.
- Corban, Michael (2009): Anlagenvernetzung: Einschienensystem Montrac erleichtert Reinraum-Einsatz - Per Shuttle durch den Reinraum. In: medizin & technik, 04 (2009) S.46.
- Corning (o. J.): Display Technologies | Advanced Large-Generation LCD Glass. Verfügbar: http://www.corning.com/displaytechnologies/en/products/large_gen.aspx (Zugriff am: 04.11.2012).
- Corsten, Hans/Gössinger, Ralf (2012): Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2012.
- Crawford, Gregory P. (Hrsg.) (2005): Flexible Flat Panel Displays. John Wiley & Sons, West Sussex 2005.
- Cunningham, S.P./Spanos, C.J./Voros, K. (1995): Semiconductor yield improvement: results and best practices. In: IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 8(1995)2, S. 103 –109.
- D'Andrade, B. W./Forrest, S. R. (2004): White Organic Light-Emitting Devices for Solid-State Lighting. In: Advanced Materials, 16(2004)18, S. 1585–1595.
- Dangelmaier, Wilhelm (2009): Theorie der Produktionsplanung und -steuerung: Im Sommer keine Kirschpralinen? Springer, Wiesbaden 2009.
- Das, Raghu/Harrop, Peter (2007): Organic & Printed Electronics Forecasts, Players & Opportunities 2007-2027. IDTechEx, 2007.

- DeBresson, Chris/Amesse, Fernand (1991): Networks of innovators :A review and introduction to the issue. In: Research Policy, 20(1991)5, S. 363–379.
- Deibel, Carsten/Dyakonov, Vladimir (2010): Polymer–fullerene bulk hetero-junction solar cells. In: Reports on Progress in Physics, 73(2010)9, S. 096401.
- Dennler, G./Brabec, C. J. (2009): Socio-Economic Impact of Low-Cost PV Technologies. In: Brabec, Christoph J./Dyakonov, Vladimir/Scherf, Ullrich (Hrsg.): Organic Photovoltaics. Wiley VCH Verlag, Weinheim 2009, S. 531–566.
- Dessouky, M. M./Adiga, S./Park, K. (1995): Design and scheduling of flexible assembly lines for printed circuit boards. In: International Journal of Production Research, 33(1995)3, S. 757–775.
- Destriau, George (1936): Recherches sur les scintillations des sulfures de zinc aux rayons. In: J. Chim. Phys, (1936)33, S. 587–625.
- Detzer, Rüdiger (2012): Reinraumtechnische Schutzkonzepte. In: Gail, Lothar/Gommel, Udo/Hortig, Hans-Peter (Hrsg.): Reinraumtechnik. Springer, Heidelberg 2012, S. 97–118.
- Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) (1965): DIN Norm 6789: Zeichnungs-systematik. Berlin 1965.
- Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) (2003): DIN Norm 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Berlin 2003.
- Dieringer, Rolf u. a. (2011): Experimental Analyses and Numerical Studies of Crack Formation in Functional Printed Structures. Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C) Frankfurt am Main 2011.
- Dieringer, Rolf/Becker, W (2012): Experimentelle Analysen und Finite-Elemente-Berechnungen zur Untersuchung der Rissinitiierung in gedruckter organischer Elektronik. Presented at 44. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge 2012.

- Dilfer, Stefan/Dörsam, Edgar (2009): Einsatzmöglichkeit von Drucktechniken zum Drucken funktionaler Anwendungen. In: Sartorius, Jürgen/Hummel, Sebastian (Hrsg.) Nanotechnologie in Kunststoff, (2009), S. 106–109.
- Dimitrakopoulos, C. D/Malenfant, P. R.L (2002): Organic thin film transistors for large area electronics. In: Advanced Materials, 14(2002)2, S. 99.
- Domschke, W./Scholl, A. (2005): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Springer, Weinheim 2005.
- Dörsam, Edgar (2010): Forum Organic Electronics - Wege zum funktionalen Drucken. Presented at Kolloquium Organische Elektronik Heidelberg 2010.
- Dörsam, Edgar (2011): Printing Technology for Electronics. Lecture, summer term 2011, Heidelberg.
- Dörsam, Edgar (o. J.): Drucklabor mit dreistufigen Aufbau. IDD - Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren. Verfügbar: http://www.idd.tu-darmstadt.de/re_search/equipm/printing_lab/index.de.jsp (Zugriff am: 09.08.2012).
- Duggal, Anil (2008): Worlds First Demonstration Of Roll To Roll Processed Oleds : Blog : GE Global Research. World's first demonstration of "Roll-to-Roll" Processed OLEDs. Verfügbar: <http://ge.geglobalresearch.com/blog/worlds-first-demonstration-of-roll-to-roll-processed-oleds/> (Zugriff am: 03.09.2012).
- Duguay, C. R./Landry, S./Pasin, F. (1997): From mass production to flexible/agile production. In: International Journal of Operations & Production Management, 17(1997)12, S. 1183–1195.
- Dyakonov, V./Pfeiffer, M. (2003): Organische Solarzellen. Presented at Jahrestagung PV-UNI-NETZ. Berlin 2003.
- Dyckhoff, Harald/Spengler, Thomas (2004): Produktionswirtschaft. Springer, Wiesbaden 2004.
- Dyer, J. H./Singh, H. (1998): The relational view: Cooperative strategy and sources of interorganizational competitive advantage. In: Academy of management review, 23(1998)4, S. 660–679.

- Ebert, M. (1998): Evaluation von Synergien bei Unternehmenszusammenschlüssen. Dissertation, Verlag Dr. Kovac, Hamburg (1998).
- El-Kareh, B./Ghatalia, A./Satya, A.V.S. (1995): Yield management in microelectronic manufacturing. In: Electronic Components and Technology Conference, 1995. Proceedings., 45th, (1995), S. 58–63.
- Engers, B./Bauer, H.U (1999): Cost-effective PVD coatings in batch systems. In: Surface and Coatings Technology, 116–119(1999)0, S. 705–710.
- Eritt, M. u. a. (2010): OLED manufacturing for large area lighting applications. In: Thin Solid Films, 518(2010)11, S. 3042–3045.
- Erlach, Klaus (2010): Wertstromdesign Der Weg zur schlanken Fabrik. Springer, Wiesbaden 2010.
- Ermschel, Ulrich/Möbius, Christian/Wengert, Holger (2011): Investition und Finanzierung. Springer, Wiesbaden 2011.
- Ernst, Christian/Schmauz, Günther/Kreck, Guido (2012): Systeme und Konzepte der Reinraumtechnik. In: Gail, Lothar/Gommel, Udo/Hortig, Hans-Peter (Hrsg.): Reinraumtechnik. Springer, Heidelberg 2012, S. 1–35.
- Espinosa, N. u. a. (2010): Towards low-cost manufacturing of organic solar cells: multi-criteria assessment of fabrication technologies. Presented at International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'10) Granada 2010
- Espinosa, Nieves u. a. (2011): Life cycle assessment of ITO-free flexible polymer solar cells prepared by roll-to-roll coating and printing. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, 97(2011) S. 3-13.
- Espinosa, Nieves u. a. (2011): A life cycle analysis of polymer solar cell modules prepared using roll-to-roll methods under ambient conditions. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, 95(2011)5, S. 1293–1302.
- Espinosa, Nieves u. a. (2012): Solar cells with one-day energy payback for the factories of the future. In: Energy & Environmental Science, 5(2012)1, S. 5117.

- Espinosa, Nieves/Garcia-Valverde, Rafael/Krebs, Frederik C (2011): Life-cycle analysis of product integrated polymer solar cells. In: *Energy Environ. Sci.*, 4(2011)5, S. 1547–1557.
- ETG Print Medien Logistik GmbH (2012): ETG Print Medien Logistik International: Papierlogistik. Papierlogistik. Verfügbar: <http://www.etglogistik.eu/papierlogistik.htm> (Zugriff am: 31.10.2012).
- Euler, Thorsten (2012): Geschwindigkeiten im Rollensiebdruck. persönliche Kommunikation am 25.09.2012 (2012).
- Fahland, Matthias (2009): Reel-to-Reel Processing of Highly Conductive Metal Oxides. In: Brabec, Christoph/Dyakonov, Vladimir/Scherf, Ullrich (Hrsg.): *Organic Photovoltaics*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2009, S. 425–439.
- Feise, H.j. (2002): Gedanken zur Zukunft der Feststoffverfahrenstechnik. In: *Chemie Ingenieur Technik*, 74(2002)12, S. 1661–1665.
- Fischer, B. (2006): Vertikale Innovationsnetzwerke: eine theoretische und empirische Analyse. Dissertation. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden 2006.
- Fleisch, Elgar/Mattern, Friedemann (2005): *Das Internet der Dinge: Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen*. Springer, Wiesbaden 2005.
- Florescu, Elizabeth/Gordon, Theodore J./Glenn, Jerome C. (2012): 2012 State of the Future. The Millennium Project, Washington 2012.
- Forrest, Stephen R. (2004): The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic. In: *Nature*, 428(2004)6986, S. 911–918.
- Freeman, C. (1991): Networks of innovators: A synthesis of research issues. In: *Research Policy*, 20(1991)5, S. 499–514.
- Frey, M. u. a. (2011a): Front-side Metalization By Means Of Flexographic Printing. Presented at 1st International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics, Freiburg 2011.

- Frey, Michael u. a. (2011b): Front-side Metalization By Means Of Flexographic Printing. In: Energy Procedia, 8(2011)0, S. 581–586.
- Gabler Verlag (Hrsg.) (2010): Gabler Kompakt-Lexikon Wirtschaft: 4.500 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden. Gabler, Wiesbaden 2010.
- Gahl, Andreas (1991): Die Konzeption strategischer Allianzen. Dissertation, Duncker & Humblot, Berlin 1991.
- Gaikwad, Abhinav M. u. a. (2011): Highly Flexible, Printed Alkaline Batteries Based on Mesh-Embedded Electrodes. In: Advanced Materials, 23(2011)29, S. 3251–3255.
- Gail, Lothar/Gommel, Udo/Hortig, Hans-Peter (Hrsg.) (2012): Reinraumtechnik. Springer, Heidelberg 2012.
- Galagan, Yulia u. a. (2011): Technology development for roll-to-roll production of organic photovoltaics. In: Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 50(2011)5-6, S. 454–461.
- Gamota, Daniel u. a. (Hrsg.) (2004): Printed Organic and Molecular Electronics. Springer, Wiesbaden 2004.
- Gamota, Daniel/Zhang, Jie (2007): Organic and Printed Electronics: The Next Big Thing? In: Printed Circuit Design & Manufacture, 24(2007)2, S. 36–40.
- Garnier, Francis u. a. (1994): All-Polymer Field-Effect Transistor Realized by Printing Techniques. In: Science, 265(1994)5179, S. 1684–1686.
- Geffroy, Bernard/le Roy, Philippe/Prat, Christophe (2006): Organic light-emitting diode (OLED) technology: materials, devices and display technologies. In: Polymer International, 55(2006)6, S. 572–582.
- Gerpott, Torsten J. (2005): Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement: Eine konzentrierte Einführung. 2., überarb. u. erw. A. Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2005.
- Ghosh, D. S./Chen, T. L./Pruneri, V. (2010): High figure-of-merit ultrathin metal transparent electrodes incorporating a conductive grid. In: Applied Physics Letters, 96(2010)4, S. 041109–041109–3.

- Gillett, K. (2003): Gravure: Process and Technology. 2nd Edition. GAA and GEF, New York 2003.
- Giroto, Claudio u. a. (2009): Exploring spray coating as a deposition technique for the fabrication of solution-processed solar cells. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(2009)4, S. 454–458.
- Gonzalez-Macia, Laura u. a. (2010): Advanced printing and deposition methodologies for the fabrication of biosensors and biodevices. In: Analyst, 135(2010)5, S. 845–867.
- Götze, Uwe (2008): Investitionsrechnung: Modelle Und Analysen Zur Beurteilung Von Investitionsvorhaben. Springer, Wiesbaden 2008.
- Griesheimer, Stefan/Dörsam, Edgar (2012): Ink splitting and the influence of structured surfaces during the flexo printing. Presented at 39th International Research Conference of iarigai, Ljubljana 2012.
- Grün, Oskar/Kummer, Sebastian/Jammernegg, Werner (2009): Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. Pearson Deutschland, München 2009.
- Günther, Hans-Otto u. a. (2012): Lagerhaltungssysteme. In: Produktion und Logistik. Springer, Heidelberg 2012, S. 267–293.
- Günther, Hans-Otto/Tempelmeier, Horst (2012a): Produktion als Wertschöpfungsprozeß. In: Produktion und Logistik. Springer, Berlin, Heidelberg 2012, S. 1–29.
- Günther, Hans-Otto/Tempelmeier, Horst (2012b): Produktion und Logistik. Springer, Heidelberg 2012.
- Günthner, Willibald A. (2006): Produktionslogistik - Wertschöpfung oder Kostenfaktor. Presented at Kongress Supply-Chain-Management - Kosten sparen, Produktivität steigern. München, 29.06.2006.
- Gupta, D. (1993): On measurement and valuation of manufacturing flexibility. In: The International Journal of Production Research, 31(1993)12, S. 2947–2958.

- Hadipour, A./de Boer, B./Blom, P. W. M (2008): Organic Tandem and Multi-Junction Solar Cells. In: *Advanced Functional Materials*, 18(2008)2, S. 169–181.
- Hagedoorn, J./Schakenraad, J. (1990): Strategic partnering and technological co-operation. Bericht. Maastricht 1990.
- Hagenhoff, S. (2004): Kooperationsformen: Grundtypen und spezielle Ausprägungen. Arbeitsbericht Nr. 4/2004.
- Hagenhoff, Svenja (2008): Innovationsmanagement für Kooperationen ; eine instrumentenorientierte Betrachtung. Dissertation. Universitätsverlag, Göttingen 2008.
- Halls, J. J. M. u. a. (1996): Exciton diffusion and dissociation in a poly (p-phenylenevinylene)/C 60 heterojunction photovoltaic cell. In: *Applied Physics Letters*, 68(1996)22, S. 3120–3122.
- Han, Guanghua/Dong, Ming/Shao, Xiaofeng (2011): Yield management with downward substitution and uncertainty demand in semiconductor manufacturing. In: *International Journal of Production Research*, 50(2011)3, S. 743–756.
- Hans, M. u. a. (2000): High-volume PVD coating of precision components of large volumes at low process costs. In: *Surface and Coatings Technology*, 123(2000)2–3, S. 288–293.
- Harkema, Stephan (2010): Printing strategies for reliable and flexible organic lighting and signage. Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C) Frankfurt am Main 2010.
- Hart, A.L/Matthews, C/Collier, W.A (1999): Estimation of lactate in meat extracts by screen-printed sensors. In: *Analytica Chimica Acta*, 386(1999)1–2, S. 7–12.
- Hartel, Marko/Lotter, Bruno (2006): Planung und Bewertung von Montagesystemen. In: Lotter, Bruno/Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*. Springer, Heidelberg 2006, S. 407–432.

- Hatch, Nile W./Mowery, David C. (1998): Process Innovation and Learning by Doing in Semiconductor Manufacturing. In: Management Science, 44(1998)11-Part-1, S. 1461–1477.
- Hauschildt, Jürgen/Salomo, Sören (2011): Innovationsmanagement. Vahlen, München 2011.
- Helbig, T./Bosse, R. (1993): Druckqualität - Grundlagen der Qualitätsbewertung im Offsetdruck. Polygraph Fachmedien, Bielefeld 1993.
- Helfrich, Christian (2002): Praktisches Prozess-Management: Vom PPS-System zum Supply chain Management. Hanser Verlag, München 2002.
- Heliatek GmbH (2012): Heliatek erzielt mit 10,7% Effizienz neuen Weltrekord für seine organische Tandemzelle. Verfügbar: http://www.heliatek.com/newscenter/latest_news/heliatek-erzielt-mit-107-effizienz-neuen-weltrekord-fur-seine-organische-tandemzelle/ (Zugriff am: 05.10.2012).
- Heliatek GmbH (o. J.): Vorteile der OPV-Technologie. Verfügbar: <http://www.heliatek.com/technologie/vorteile> (Zugriff am: 01.11.2012)
- Hengen, S. u. a. (2010): A New Measurement Standard for Organic Thin Film Transistors. Presented at 1st Winter School of Organic Electronics, Heidelberg 2010.
- Herzberg, Uwe (2010): Mein Businessplan. Haufe-Lexware, Freiburg 2010.
- Heßberger, Nicolas (2012): Prozesstechnische und wirtschaftliche Analyse des Produktionsprozesses von organischer Photovoltaik. Abschlussarbeit am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) TU Darmstadt. 2012.
- Hoffmann, Peter (2010): Lagenverschiebungen und Spannungsaufbau in der Nipzone zwischen Walze und Papierlagen. Dissertation TU Darmstadt.
- Hoffmann, Peter/Desch, Michael/Dörsam, Edgar (2011): Movement of Layers and Induced Tension in the Nip Area between Drum and Paper Layers. Presented at IWeb. Oklahoma 2011.

- Hoffmann, R. C. u. a. (2010): Solution processed ZnO–Challenges in processing and performance on flexible substrates. In: *physica status solidi (a)*, 207(2010)7, S. 1590–1595.
- Hoffmann, Rudolf C./Dilfer, Stefan/Schneider, Jörg J. (2011): Transparent indium tin oxide as inkjet-printed thin film electrodes for organic field-effect transistors. In: *physica status solidi (a)*, 208(2011)12, S. 2920–2925.
- Hoppea, H./Sariciftci, N. S (2004): Organic solar cells: An overview. In: *J. Mater. Res.*, 19(2004)7, S. 1925.
- Horowitz, G. (1998): Organic field-effect transistors. In: *Advanced Materials*, 10(1998)5, S. 365–377.
- Horowitz, Gilles (2004): Organic Thin Film Transistors: From Theory to Real Devices. In: *Journal of Materials Research*, 19(2004)07, S. 1946–1962.
- Hösel, Markus/Krebs, Frederik C. (2012): Large-scale roll-to-roll photonic sintering of flexo printed silver nanoparticle electrodes. In: *Journal of Materials Chemistry*, 22(2012)31, S. 15683.
- Hu, Liangbing u. a. (2010): Scalable Coating and Properties of Transparent, Flexible, Silver Nanowire Electrodes. In: *ACS Nano*, 4(2010)5, S. 2955–2963.
- Hübner, A. u. a. (2002): High volume printing technologies for the production of polymer electronic structures. In: 2nd International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics. POLY-TRONIC 2002. Conference Proceedings (Cat. No.02EX599). Zalaegerszeg, Hungary 2002, S. 172–176.
- Hübner, Jörg/Nendel, Klaus/Dombeck, Uwe (2011): Flexibles Bodenfördersystem für den Montageprozess. In: *Logistics Journal: Proceedings*, 07(2011)1.
- Hübner, G. (1991): Ein Beitrag zum Problem der Flüssigkeitsspaltung in der Drucktechnik. Dissertation TU Darmstadt, 1991.

- Hug, Rolf (2007): Organische Photovoltaik: Solarstrom aus hauchdünnen Farb- und Kunststoff-Folien. Verfügbar: http://www.solarserver.de/solarmagazin/solar-report_0807.html (Zugriff am: 03.09.2012).
- Hunklinger, Siegfried (2009): Festkörperphysik. Oldenbourg Verlag, München 2009.
- IanJames, D. u. a. (2012): Organic Semiconductor Materials for Transistors. In: Organic Electronics II: More Materials and Applications, Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2012), S. 3.
- Illuminating Engineering Society of North America (2000): IESNA Lighting Handbook. Verfügbar: <http://www.scribd.com/doc/46634221/IESNA-Lighting-Handbook> (Zugriff am: 15.06.2012).
- Ivers-Tiffée, Ellen/Münch, Waldemar von (2007): Werkstoffe der Elektrotechnik. 10 Auflage. Springer, Wiesbaden 2007.
- Jakimovski, P. u. a. (2012): Design of a printed organic RFID circuit with an integrated sensor for smart labels. Presented at 2012 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD). Chemnitz 2012, S. 1–6.
- Jansen, Jan H. (1980): Transistor-Handbuch: Eine umfassende Darstellung der Transistortechnik in Theorie und Praxis für Techniker und Ingenieure. Franzis Verlag, Haar 1980.
- Jurchescu, O. D. u. a. (2012): Interplay between Processing, Structure, and Electronic Properties in Soluble Small-Molecule Organic Semiconductors. In: Organic Electronics II. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2012, S. 327–352.
- Kalowekamo, Joseph/Baker, Erin (2009): Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells. In: Solar Energy, 83(2009)8, S. 1224–1231.
- Kamtekar, Kiran T./Monkman, Andrew P./Bryce, Martin R. (2010): Recent Advances in White Organic Light-Emitting Materials and Devices (WOLEDs). In: Advanced Materials, 22(2010)5, S. 572–582.
- Kietzke, Thomas (2007): Recent Advances in Organic Solar Cells. In: Advances in OptoElectronics, 2007(2007), S. 1–15.

- Killich, Stephan (2011): Formen der Unternehmenskooperation. In: Becker, Thomas u. a. (Hrsg.): Netzwerkmanagement. Springer, Heidelberg 2011, S. 13–22.
- Kim, H. u. a. (1999): Electrical, optical, and structural properties of indium–tin–oxide thin films for organic light-emitting devices. In: Journal of Applied Physics, 86(1999)11, S. 6451–6461.
- Kim, Ji Whan u. a. (2011): Formation of Bulk Heterojunctions by Alternative Thermal Deposition and Its Structure Analysis for High Efficiency Small Molecular Organic Photovoltaics. In: Advanced Functional Materials, 21(2011)11, S. 2067–2071.
- Kim, Jin Young u. a. (2007): Efficient Tandem Polymer Solar Cells Fabricated by All-Solution Processing. In: Science, 317(2007)5835, S. 222–225.
- Kim, Yong Hyun u. a. (2011): Highly Conductive PEDOT:PSS Electrode with Optimized Solvent and Thermal Post-Treatment for ITO-Free Organic Solar Cells. In: Advanced Functional Materials, 21(2011)6, S. 1076–1081.
- Kippelen, Bernard/Brédas, Jean-Luc (2009): Organic photovoltaics. In: Energy & Environmental Science, 2(2009)3, S. 251.
- Kipphan, Helmut (2001): Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods. Springer, Berlin 2001.
- Klauk, Hagen (Hrsg.) (2006): Organic electronics: materials, manufacturing and applications. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2006.
- Klaus, Peter/Krieger, Winfried (2008): Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse;[A- Z]. Springer, Wiesbaden 2008.
- Kleinschmidt, Elko J./Geschka, Horst/Cooper, R. G. (2012): Erfolgsfaktor Markt: Kundenorientierte Produktinnovation (Innovations- und Technologiemanagement). Springer, Wiesbaden 2012.
- Kline, S. J./Rosenberg, Nathan (1986): An Overview of Innovation. In: Landau, Ralph/Rosenberg, Nathan (Hrsg.): The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth. National Academy Press, Washington 1986.

- Kluger, Reinmhard (2006): Der Fortschritt kam gedruckt aus Europa. In: Elektronikpraxis, (2006)14, S. 72f.
- Knobloch, A. u. a. (2004): Fully printed integrated circuits from solution processable polymers. In: Journal of Applied Physics, 96(2004)4, S. 2286–2291.
- Ko, Seung H. u. a. (2007): Air stable high resolution organic transistors by selective laser sintering of ink-jet printed metal nanoparticles. In: Applied Physics Letters, 90(2007)14, S. 141103.
- Koidis, C. u. a. (2011): Substrate treatment and drying conditions effect on the properties of roll-to-roll gravure printed PEDOT:PSS thin films. In: Materials Science and Engineering: B, 176(2011)19, S. 1556–1561.
- Konstantin, Panos (2009): Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -Transport Und-Beschaffung Im Liberalisierten Markt. Springer, Wiesbaden 2009.
- Kopola, P. u. a. (2010): High efficient plastic solar cells fabricated with a high-throughput gravure printing method. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, 94(2010)10, S. 1673–1680.
- Kopola, Pálvi u. a. (2011): Gravure printed flexible organic photovoltaic modules. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, 95(2011)5, S. 1344–1347.
- Krebs, Frederik C. u. a. (2009): A complete process for production of flexible large area polymer solar cells entirely using screen printing—First public demonstration. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(2009)4, S. 422–441.
- Krebs, Frederik C. (2009a): Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(2009)4, S. 394–412.
- Krebs, Frederik C. (2009c): All solution roll-to-roll processed polymer solar cells free from indium-tin-oxide and vacuum coating steps. In: Organic Electronics, 10(2009)5, S. 761–768.

- Krebs, Frederik C. (2010): *Polymeric Solar Cells: Materials, Design, Manufacture*. DEStech Publications, Lancaster 2010.
- Krebs, Frederik C. u. a. (2011): The OE-A OPV demonstrator anno domini 2011. In: *Energy Environ. Sci.*, 4(2011)10, S. 4116–4123.
- Krebs, Frederik C./Fyenbo, Jan/Jorgensen, Mikkel (2010): Product integration of compact roll-to-roll processed polymer solar cell modules: methods and manufacture using flexographic printing, slot-die coating and rotary screen printing. In: *J. Mater. Chem.*, 20(2010)41, S. 8994–9001.
- Krebs, Frederik C./Gevorgyan, Suren A./Alstrup, Jan (2009): A roll-to-roll process to flexible polymer solar cells: model studies, manufacture and operational stability studies. In: *Journal of Materials Chemistry*, 19(2009)30, S. 5442–5451.
- Krebs, Frederik C./Tromholt, Thomas/Jorgensen, Mikkel (2010): Upscaling of polymer solar cell fabrication using full roll-to-roll processing. In: *Nanoscale*, 2(2010)6, S. 873–886.
- Kröll, Karl/Kast, W (1989): *Trocknungstechnik: Trocknen und Trockner in der Produktion*. Springer, Heidelberg 1989.
- Kulys, Juozas/D’Costa, Eric J. (1991): Printed electrochemical sensor for ascorbic acid determination. In: *Analytica Chimica Acta*, 243(1991)0, S. 173–178.
- Kumar, N. u. a. (2006): A review of yield modelling techniques for semiconductor manufacturing. In: *International Journal of Production Research*, 44(2006)23, S. 5019–5036.
- Kymakis, E./Amaratunga, G. A. J (2002): Single-wall carbon nanotube/conjugated polymer photovoltaic devices. In: *Applied Physics Letters*, 80(2002)1, S. 112–114.
- Lane, P. A./Kafafi, Z. H. (2005): Solid-state organic photovoltaics: a review of molecular and polymeric devices. In: Sun/Sariciftci, Niyazi Serdar (Hrsg.): *Organic Photovoltaics: Mechanisms, Materials, and Devices*. 2005, S. 49.

- Lange, Alexander u. a. (2010): A new approach to the solvent system for inkjet-printed P3HT:PCBM solar cells and its use in devices with printed passive and active layers. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2010)10, S. 1816–1821.
- Lee, Chia-Yen/Johnson, Andrew L. (2011): A decomposition of productivity change in the semiconductor manufacturing industry. In: *International Journal of Production Research*, 49(2011)16, S. 4761–4785.
- Lee, Hyunjin u. a. (2006): Sub-5nm All-Around Gate FinFET for Ultimate Scaling. Presented at Symposium on VLSI Technology. 2006, S. 58 –59.
- Leo, Karl (2011a): Highly Efficient Organic LED. Presented at European ZigBee Developers' Conference, München 2011.
- Leo, Karl (2011b): Organische Elektronik. Presented at Akademietag München 2011.
- Li, Der-Chiang u. a. (2011): A new approach for manufacturing forecast problems with insufficient data: the case of TFT–LCDs. In: *Journal of Intelligent Manufacturing*, (2011), S. 1–9.
- Li, Gang/Zhu, Rui/Yang, Yang (2012): Polymer solar cells. In: *Nature Photonics*, 6(2012)3, S. 153–161.
- Liu, Jialu u. a. (2012): Multi-state throughput analysis of a two-stage manufacturing system with parallel unreliable machines and a finite buffer. In: *European Journal of Operational Research*, 219(2012)2, S. 296–304.
- Loh, Gerald (2006): Passermessung an Druckmaschinen mit konventioneller Videotechnik. Dissertation TU Dresden, 2006.
- Van Loon, Niels u. a. (2012): Cost of Ownership Calculations for OPV. Presented at MRS Fall Meeting & Exhibit. Boston 2012.
- MacDonald, William A. (2009): Flexible Substrates Requirements for Organic Photovoltaics. In: Brabec, Christoph/Dyakonov, Vladimir/Scherf, Ullrich (Hrsg.): *Organic Photovoltaics*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2009, S. 469–489.

- Malik, Fredmund (1996): Systemisches Management und systemisches Projektmanagement. In: Balck, Henning (Hrsg.): Networking und Projektorientierung: Gestaltung des Wandels in Unternehmen und Märkten. Springer, Berlin 1996, S. 145–164.
- Mantysalo, M. u. a. (2012): System integration of smart packages using printed electronics. Presented at Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2012 IEEE 62nd. San Diego, 2012, S. 997 –1002.
- Markham, J. P. J. u. a. (2002): High-efficiency green phosphorescence from spin-coated single-layer dendrimer light-emitting diodes. In: Applied Physics Letters, 80(2002)15, S. 2645–2647.
- Mattern, F. (2001): Ubiquitous Computing–Der Trend zur Informatisierung und Vernetzung aller Dinge. In: Mobile Internet, Tagungsband, 6(2001), S. 107–119.
- Mattox, D. M. (2010): Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing. William Andrew Pub, Norwich 2010.
- McGeehee, Michael (2012): Printing Solar Cells for Greener Energy. Presented at SLAC Public Lecture. Stanford 2012.
- Meder, G./Wandji, B. (2009): Bahnrisse in Heatset-Rollenoffset-Rotationen - Ursachen und Strategien zur Minimierung. Presented at Jahrestagung 2009 des Vereins Deutscher Druckingenieure e.V. Osnabrück, 2009.
- Meerholz, Klaus/Müller, Christoph-David/Nuyken, Oskar (2006): Crosslinkable Organic Semiconductors for Use in Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs). In: Müllen, Klaus/Scherf, Ullrich (Hrsg.): Organic Light Emitting Devices. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2006, S. 293–318.
- Meyer, J. u. a. (2008): Indium-free transparent organic light emitting diodes with Al doped ZnO electrodes grown by atomic layer and pulsed laser deposition. In: Applied Physics Letters, 93(2008)7, S. 073308–073308–3.
- Mietzner, Dana (2009): Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen: Methodenevaluation und neue Ansätze. Dissertation. Gabler, Wiesbaden 2009.

- Mitschke, Ullrich/Bäuerle, Peter (2000): The electroluminescence of organic materials. In: Journal of Materials Chemistry, 10(2000)7, S. 1471–1507.
- Mitzi, David B. (2004): Solution-processed inorganic semiconductors - Journal of Materials Chemistry. In: Journal of Materials Chemistry, (2004)15, 2004.
- Mitzi, David B. (Hrsg.) (2008): Solution Processing of Inorganic Materials. John Wiley & Sons, New Jersey 2008.
- Moro, Lorenza/Visser, Robert Jan (2009): Barrier Films for Photovoltaics Applications. In: Brabec, Christoph/Dyakonov, Vladimir/Scherf, Ullrich (Hrsg.): Organic Photovoltaics. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2009, S. 491–510.
- Müller-Meskamp, Lars u. a. (2012): Transparente leitfähige Elektroden. In: Vakuum in Forschung und Praxis, 24(2012)4, S. 24–31.
- Na, Seok-In u. a. (2010): Fully spray-coated ITO-free organic solar cells for low-cost power generation. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, 94(2010)8, S. 1333–1337.
- Nasibulin, Albert G. u. a. (2011): Multifunctional Free-Standing Single-Walled Carbon Nanotube Films. In: ACS Nano, 5(2011)4, S. 3214–3221.
- Nič, Miloslav u. a. (Hrsg.): (2012): transmittance. In: IUPAC Compendium of Chemical Terminology. Blackwell Science, 2012.
- Noriega, R./Salleo, A./Klauk, Hagen (2012): Charge Transport Theories in Organic Semiconductors. In: Organic Electronics II - More Materials and Applications. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2012.
- Nuyken, Oskar u. a. (2002): Crosslinkable hole- and electron-transport materials for application in organic light emitting devices (OLEDs). In: Designed Monomers & Polymers, 5(2002)2-3, S. 195–210.
- o A (2009): Endbericht zur Branchenanalyse „Photovoltaik in Baden-Württemberg“. Bonn 2009.

- o A (2012a): Industriestrompreise in Deutschland bis 2011 | Statistik. Statista. Verfügbar: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/155964/umfrage/entwicklung-der-industriestrompreise-in-deutschland-seit-1995/> (Zugriff am: 29.09.2012).

- o A (2012b): Polyera Achieves World-Record Organic Solar Cell Performance - Polyera Corporation. Verfügbar: <http://www.polyera.com/newsflash/polyera-achieves-world-record-organic-solar-cell-performance> (Zugriff am: 05.10.2012).

- o A (2012c): Konarka Technologies Advances Award Winning Power Plastic Solar Cell Efficiency with 9% Certification. Verfügbar: http://www.solardaily.com/reports/Konarka_Technologies_Advances_Award_Wining_Power_Plastic_Solar_Cell_Efficiency_with_9%25_Certification_99.html (Zugriff am: 05.10.2012).

- o A (2012d): Schlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt „Gedruckte organische Schaltungen und Speicher“ (Polytos). Heidelberg 2012.

- o A (2012e): Polyera Achieves 5.2% All-Polymer Organic Solar Cells - Polyera Corporation. Verfügbar: <http://www.polyera.com/newsflash/polyera-achieves-5-2-all-polymer-organic-solar-cells> (Zugriff am: 05.10.2012).

- O'Regan, B./Grätzel, M. (1991): A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized. In: nature, 353(1991), S. 24.

- OE-A (2012): OE-A has 200 Members in 31 Countries. Verfügbar: http://www.vdma.org/wps/portal/Home/en/Branchen/O/OEA/Press_/OEA_Press_StK_20120830_200members_en?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/vdma/Home/en/Branchen/O/OEA/Press_/OEA_Press_StK_20120830_200members_en (Zugriff am: 02.11.2012).

- Olhager, J. (1993): Manufacturing flexibility and profitability. In: International journal of production economics, 30(1993), S. 67–78.

- Ouyang, Xu u. a. (2007): Yield Learning Methodology in Early Technology Development. Presented at Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, ASMC 2007. IEEE/SEMI. Stresa, Italy. 2007, S. 333 –340.

- Pahl, Gerhard u. a. (2007): Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen Erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden Und Anwendung. 7. Auflage. Springer, Berlin Heidelberg 2007.
- Pankalla, S. u. a. (2011): Ein Smart Label zum Auslesen und Übertragen von Temperaturwerten basierend auf organischer Elektronik. Presented at MikroSystemTechnik - Kongress, Darmstadt, (2011).
- Pankalla, Sebastian u. a. (2011): Threshold Voltage and Mobility Fluctuations of Printed Organic Transistors. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Flexible Organic Electronics (IS-FOE11). Thessaloniki 2011.
- Pankalla, Sebastian u. a. (2012): Variation of electrical parameters of organic thin film transistors as a function of semiconductors layer thickness. Presented at 2nd Winter School of Organic Electronics. Heidelberg 2012.
- Pankalla, Sebastian (2012): Leistungskennzahlen von organischen Transistoren. persönliche Kommunikation am 20.09.2012 (2012).
- Pawellek, G. (2008a): Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. Springer, Heidelberg 2008.
- Pawellek, Günther (2008b): Grundlagen der ganzheitlichen Fabrikplanung. In: Pawellek, Günther (Hrsg.): Ganzheitliche Fabrikplanung. Springer, Heidelberg 2008, S. 13–62.
- Peng, Shuang u. a. (2012): Thin-film Micro-Batteries Based on Metal Nanoparticles. In: MRS Online Proceedings Library, 1440(2012).
- Perelaer, J./de Gans, B.-J./Schubert, U. S. (2006): Ink-jet Printing and Microwave Sintering of Conductive Silver Tracks. In: Advanced Materials, 18(2006)16, S. 2101–2104.
- Pérez-Bustamante, Guillermo (1999): Knowledge management in agile innovative organisations. In: Journal of Knowledge Management, 3(1999)1, S. 6–17.
- Pettersson, L. A. A./Roman, L. S./Inganäs, O. (1999): Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on organic thin films. In: Journal of Applied Physics, 86(1999)1, S. 487–496.

- Photovoltaik.eu (o. J.): Belectric übernimmt insolvente Konarka-Tochter. Photovoltaik - Das Magazin für Profis. Verfügbar: http://www.photovoltaik.eu/nachrichten/details/beitrag/belectric-bernimmt-insolvente-konarka-tochter_100009247/ (Zugriff am: 05.11.2012).
- Plastic Logic Ltd (2012): The manufacturing line at Plastic Logic's Dresden facility. Verfügbar: <http://www.youtube.com/watch?v=OAzE-n6DeFM&feature=plcp> (Zugriff am: 31.10.2012).
- Porter, M. E. (1979): How competitive forces shape strategy. In: Smit, P.J. (Hrsg.): Strategic Planning: Readings. Juta Academic, Kenwyn 1979, S. 102–117.
- Porter, Michael E. (1990): The competitive advantage of nations. Free Press, New York 1990.
- Porter, Michael E. (2008): The five competitive Forces that shape Strategy. In: Harvard Business Review, 86(2008)1, S. 78–93.
- Preuß, Hans-Ulrich (1970): Die Automation in Betriebswirtschaftlicher Sicht. Dissertation. Duncker & Humblot, Berlin 1970.
- Pudas, Marko (2004): Gravure-offset printing in the manufacture of ultra-fine-line thick-films for electronics. Dissertation University of Oulu. Oulu, 2004.
- Quel, Claus (2004): Deterministische und stochastische Einflußgrößen auf den Produktionsprozeß einer hochmodernen Tiefdruckrotationsmaschine. Presented at Vortragsreihe des Vereins Deutscher Druckingenieure e.V. 18.11.2004, Darmstadt, 2004.
- Rabl, Michael (2009): Kreativitätstechniken. In: Praxisorientiertes Innovations- und Produktmanagement. Gabler, Wiesbaden 2009, S. 75–90.
- Raja, Inam ul Haq u. a. (2008): Recent progress in the development of polymers for white light-emitting polymer devices. In: Monatshefte für Chemie / Chemical Monthly, 139(2008)7, S. 725–737.
- Rand, Barry P. u. a. (2007): Solar cells utilizing small molecular weight organic semiconductors. In: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 15(2007)8, S. 659–676.

- Ranfeld, Constanze/Dörsam, Edgar (2012): Structured wet etching of printed silver layers using a printed etch resist. Presented at 2nd Winter School of Organic Electronics, Heidelberg 2012.
- Ranfeld, Constanze/Sauer, Hans Martin/Dörsam, Edgar (2011): Using the Halo Effect in Flexographic Printing for the Manufacturing of Source/Drain-Structures for Thin Film Transistors. Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C), Frankfurt am Main 2011.
- Ranfeld, Constanze/Theopold, Alexandra/Dörsam, Edgar (2011): Flexographic printing for the production of inorganic electroluminescent devices. Presented at Printing Future Days 2011. Chemnitz 2011.
- Rehmann, Nina (2009): Small Molecules for Solution Processed Organic Light-Emitting Diodes. Dissertation Universität Köln. Digitaldruck Köln.Online.
- Reidel, Sonja (2006): Ein genetischer Algorithmus zur kostenorientierten Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung bei getakteten Mehrproduktfließlinien. Dissertation Universität Passau. 2006.
- Reyes-Reyes, Marisol u. a. (2005): Meso-Structure Formation for Enhanced Organic Photovoltaic Cells. In: Organic Letters, 7(2005)26, S. 5749–5752.
- Reyes-Reyes, Marisol/Kim, Kyungkun/Carroll, David L. (2005): High-efficiency photovoltaic devices based on annealed poly(3-hexylthiophene) and 1-(3-methoxycarbonyl)-propyl-1-phenyl-(6,6)C61 blends. In: Applied Physics Letters, 87(2005)8, S. 083506–083506–3.
- Rikkola, R./Korhonen, R. (2011): Promoting Entrepreneurship in Organic and Large Area Electronics in Europe. Issues and Recommendations. VTT (2011).
- Ripsas, S./Zumholz, H./Kolata, C. (2008): Der Businessplan als Instrument der Gründungsplanung-Möglichkeiten und Grenzen. Working Paper des IMB. Berlin 2008.
- Robertson, Christopher T. (2004): Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics. Prentice Hall Professional, Upper Saddle River 2004.

- Sanchez, Ron/Heene, Aime/Thomas, Howard (1996): Towards the Theory and Practice of Competence-Based Competition. In: Sanchez, Ron/Heene, Aime/Thomas, Howard (Hrsg.): Dynamics of Competence-Based Competition: Theory and Practice in the New Strategic Management. Pergamon, Münster 1996.
- Sandmeier, P. u. a. (2004): Towards a structured and integrative front-end of product innovation. Presented at Contribution to the R&D Management Conference (RADMA), Lisbon, Portugal. 2004.
- Sariciftci, N. S u. a. (1992): Photoinduced Electron Transfer from a Conducting Polymer to Buckminsterfullerene. In: Science, 258(1992)5087, S. 1474–1476.
- Sauer, Hans Martin u. a. (2012): Electrical Noise of printed OFETs and Layer Morphology. Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C), München 2012.
- Sauer, Hans Martin (2012a): Printed Electronics - Printing Fluids for Printed Electronics. Persönliche Kommunikation am 18.09.2012 (2012).
- Sauer, Hans Martin (2012b): Vorbehandlung von zu bedruckenden Oberflächen. Persönliche Kommunikation am 18.09.2012 (2012).
- Sauer, Hans Martin/Bornemann, Nils (2010): Viscous fingering in functional flexo printing: an inevitable bug? Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C), Frankfurt am Main (2010).
- Sauer, Hans Martin/Ranfeld, Constanze/Dörsam, Edgar (2010): An investigation of the screen printing process for electroluminescent panels and the influence of printing parameters on the performance of the panels. Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C), Frankfurt am Main 2010.
- Sax, Stefan u. a. (2010): Efficient Blue-Light-Emitting Polymer Heterostructure Devices: The Fabrication of Multilayer Structures from Orthogonal Solvents. In: Advanced Materials, 22(2010)18, S. 2087–2091.

- Schachtner, K. (1999): Kommunikations-und Informationsstrukturen für die Planung marktgerechter Produktinnovationen. In: Information Management and Consulting, 14(1999)3, S. 81–89.
- Schatt, Werner/Wieters, Klaus-Peter/Kieback, Bernd (2006): Pulvermetallurgie: Technologien Und Werkstoffe. Springer, Wiesbaden 2006.
- Scheller, Anne (2012): Wer spart, gewinnt – mit nachhaltigen Lösungen will die Industrie punkten. In: VDI Nachrichten, 17(2004) S. 15.
- Schmenner, R. W./Swink, M. L. (1998): On theory in operations management. In: Journal of Operations Management, 17(1998)1, S. 97–113.
- Schmidt, G.C. u. a. (2010): Modified mass printing technique for the realization of source/drain electrodes with high resolution. In: Organic Electronics, 11(2010)10, S. 1683–1687.
- Schmidt, Patrick (2012): Entwicklung einer Theorie zur Bestimmung des optimalen Zeitpunktes der Vereinzelung im Produktionsprozess von organischer Photovoltaik -OPV. Abschlussarbeit am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) TU Darmstadt. 2012.
- Schnabel, Holger (2009): Entwicklung von Methoden zur Registerregelung in Abhängigkeit der Bahnzugkraft bei Rollentiefdruckmaschinen. Dissertation TU Darmstadt. 2009
- Schneider, Jörg J. u. a. (2011): Zirconia and hafnia films from single source molecular precursor compounds: Synthesis, characterization and insulating properties of potential high k-dielectrics. In: Materials Science and Engineering: B, 176(2011)13, S. 965–971.
- Schnell, H. J (2011): Organische Elektronik in Deutschland: Bewertung und Empfehlungen für die Weiterentwicklung. acatech (Hrsg.). Springer, Berlin Heidelberg 2011.
- Schroder, Dieter K (2006): Semiconductor Material and Device Characterization. John Wiley & Sons, Piscataway 2006.
- Schulz, E. (1987): Flexodruck von A bis Z. Polygraph Verlag, Frankfurt am Main 1987.

- Schumpeter, J. A. (1926): Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung: Eine Untersuchung über Unternehmergewinn, Kapital, Kredit, Zins und den Konjunkturzyklus. Duncker & Humblot, München (1926).
- Schumpeter, Joseph (1911): Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. Duncker & Humblot, München und Leipzig 1911.
- Schumpeter, Joseph A. (2002): New Translations from Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. In: American Journal of Economics and Sociology, 61(2002)2, S. 405–437.
- Schüttler, Akira (2011): Vergleich von Rollen- und Bogendruck - Eine technische Analyse. Abschlussarbeit am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) TU Darmstadt. 2011.
- Schwambers, Markus u. a. (2002): 27.4: Modeling and Fabrication of Organic Vapor Phase Deposition (OVPD) Equipment for OLED Display Manufacturing. In: SID Symposium Digest of Technical Papers, 33(2002)1, S. 894–897.
- Sethi, A. K/Sethi, S. P (1990): Flexibility in manufacturing: a survey. In: International journal of flexible manufacturing systems, 2(1990)4, S. 289–328.
- Sheats, James R. (2011): Manufacturing and commercialization issues in organic electronics. In: Journal of Materials Research, 19(2011), S. 1974–1989.
- Shi, C. u. a. (2011): Fabrication of wireless sensors on flexible film using screen printing and via filling. In: Microsystem Technologies, 17(2011)4, S. 661–667.
- Shilov, Anton (2009): Intel Outlines Process Technology Roadmap. X-bit labs. Verfügbar: http://www.xbitlabs.com/news/cpu/display/20090822094141_Intel_Outlines_Process_Technology_Roadmap.html (Zugriff am: 29.10.2012).
- Shin, Dong-Youn/Lee, Yongshik/Kim, Chung Hwan (2009): Performance characterization of screen printed radio frequency identification antennas with silver nanopaste. In: Thin Solid Films, 517(2009)21, S. 6112–6118.

- Shinar, Ruth/Shinar, Joseph (2009): Organic Electronics in Sensors and Biotechnology. McGraw-Hill Prof Med/Tech, New York City 2009.
- Shirakawa, H. u. a. (1977): Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)_x. In: J. Chem. Soc., Chem. Commun., (1977)16, S. 578–580.
- Shirakawa, H./McDiarmid, A./Heeger, A. (2003): Twenty-five years of conducting polymers. In: Chemical Communications, 20031, S. 1–4.
- Shockley, William/Queisser, Hans J. (1961): Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. In: Journal of Applied Physics, 32(1961)3, S. 510–519.
- Siol, Christopher (2012): Quasistatische und transiente Oberflächenpotentialverteilungen organischer Feldeffekttransistoren. Dissertation TU Darmstadt 2012.
- Sirringhaus, Henning (2007): Charge Transport Physics of Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors. In: Organic Field-Effect Transistors. CRC Press, Boca Raton, 2007. S. 103–137.
- Søndergaard, Roar u. a. (2012): Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells. In: Materials Today, 15(2012)1–2, S. 36–49.
- Specht, D./Möhrle, M. G. (Hrsg.) (2002): Gabler Lexikon Technologie Management: Management von Innovationen und neuen Technologien im Unternehmen. Gabler, Wiesbaden 2002.
- Spiehl, Dieter u. a. (2012): Analysis of the mobility of printed organic p-channel transistors depending on the transistor geometry and orientation. In: Journal of Physics: Conference Series. 2012.
- Sprules, Steven D. u. a. (1996): Evaluation of a new disposable screen-printed sensor strip for the measurement of NADH and its modification to produce a lactate biosensor employing microliter volumes. In: Electroanalysis, 8(1996)6, S. 539–543.
- Stahl, Edgar/Dörsam, Edgar (2012a): Printing Technologies. In: Handbook of Paper and Board - Second, revised and enlarged Edition. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2012.

- Stahl, Simon (2009): Drucktechnologien für das Drucken funktionaler Strukturen. Abschlussarbeit am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) TU Darmstadt, 2009.
- Stahl, Simon/Dörsam, Edgar (2012b): Characterization of gravure printed PMMA layers. Presented at 2nd Winter School of Organic Electronics. Heidelberg, 2012.
- Stahl, Simon/Sauer, Hans Martin/Dörsam, Edgar (2011): Development of measurement specifications for rheological tests on fluids for printed electronics. Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C), Frankfurt am Main 2010.
- Stahl, Simon/Sauer, Hans Martin/Dörsam, Edgar (2012): Investigation in the homogeneity of gravure printed polymer films for printed electronics. Presented at 39th International Research Conference of iarigai. Ljubljana 2012.
- Steven, Marion (2006): Handbuch Produktion. W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart 2006.
- Stocker, Daniel (2012): Rollen- oder Bogendruck organischer Elektronik – Ein multikriterieller Vergleich. Abschlussarbeit am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) TU Darmstadt, 2012.
- Strassner, Martin/Fleisch, Elgar (2005): Innovationspotenzial von RFID für das Supply-Chain-Management. In: Wirtschaftsinformatik, 47(2005)1, S. 45–54.
- Stübinger, Thomas/Brütting, Wolfgang (2001): Exciton diffusion and optical interference in organic donor–acceptor photovoltaic cells. In: Journal of Applied Physics, 90(2001)7, S. 3632.
- Sun, Sam-Shajing u. a. (2008): Introduction to Organic Electronic and Optoelectronic Materials and Devices (Optical Science and Engineering Series). CRC Press, Boca Raton 2008.
- Sun, Sam-Shajing/Sariciftci, Niyazi Serdar (Hrsg.) (2005): Organic Photovoltaics: Mechanisms, Materials, and Devices. 1. Aufl. CRC Press, Boca Raton 2005.

- Tang, C. W (1986): Two-layer organic photovoltaic cell. In: Applied Physics Letters, 48(1986)2, S. 183–185.
- Tang, C. W/Albrecht, A. C (1975): Photovoltaic effects of metal–chlorophyll-a–metal sandwich cells. In: The Journal of Chemical Physics, 62(1975)6, S. 2139–2149.
- Teichler, Anke u. a. (2011): Combinatorial Screening of Polymer-Fullerene Blends for Organic Solar Cells by Inkjet Printing. In: Advanced Energy Materials, 1(2011)1, S. 105–114.
- Tentrop, Friedrich (2011): Entwicklung eines integrierten Gestaltungsansatzes der Produktionslogistik. Dissertation. Univerlag TU Berlin, 2011.
- Teschner, H. (2010): Druck & Medien Technik: Informationen gestalten, produzieren, verarbeiten. Christiani Verlag, Konstanz 2010.
- Teschner, Helmut (2002): Fachwörterbuch für visuelle Kommunikation und Drucktechnik. 3. Aufl. Ott-Verlag, Bern 2002.
- Theopold, Alexandra u. a. (2012): Effects of solvent exposure on flexographic printing plates. Presented at 39th International Research Conference of iarigai. Ljubljana 2012.
- Theopold, Alexandra/Massfelder, Daniel/Dörsam, Edgar (2012): Influence of solvents on flexographic printing plates. Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C). München 2012.
- Theopold, Alexandra/Sauer, Hans Martin/Dörsam, Edgar (2011): Characterization of flexographic printing plates with regard to the field of printed electronics. Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C). Frankfurt am Main 2011.
- Thieme, R. (2007): Ink transportation in anilox offset printing. Presented at Printing Future Days, Chemnitz. 2007, S. 129.
- Thieme, Robert (2012): Herstellung von Tiefdruckformen, Persönliche Kommunikation am 02.10.2012 (2012).

- Thieme, Robert/Jürgen Willmann (2012): Gravure and Flexo Printing under controlled Atmosphere – Machines and Processes. Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C). München 2012.
- Thieme, Robert/Oberle, Thomas/Sauer, Patrick (2012): Gravure Printing for Organic Electronics - Printing Press and Process -. Presented at Materials Science Engineering (MSE). Darmstadt 2012.
- Thommen, Jean-Paul/Achleitner, Ann-Kristin (2012): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht. 7., vollst. überarb. Aufl. 2012. Gabler, Wiesbaden 2012.
- Tille, Thomas/Schmitt-Landsiedel, Doris (2004): Mikroelektronik: Halbleiterbauelemente und deren Anwendung in elektronischen Schaltungen. Springer, Berlin Heidelberg 2004.
- Tsai, J. P. u. a. (2010): Multi-criteria decision making method for selection of machine tool. Presented at Computer Communication Control and Automation (3CA), 2010 International Symposium on. 2010, S. 49–52.
- Tsujimura, Takatoshi (2012): Oled Display Fundamentals and Applications. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey 2012.
- Uellner, Stephan (2012): Entwicklung einer Theorie zur optimalen Fertigung von organischer Photovoltaik - OPV. Abschlussarbeit am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) TU Darmstadt, 2012.
- Unander, T./Nilsson, H.-E. (2009): Characterization of Printed Moisture Sensors in Packaging Surveillance Applications. In: IEEE Sensors Journal, 9(2009)8, S. 922 –928.
- Vahs, D./Burmester, R. (2002): Innovationsmanagement: Von der Produktidee zur erfolgreichen Vermarktung. Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2002.
- Vak, D. u. a. (2007): Fabrication of organic bulk heterojunction solar cells by a spray deposition method for low-cost power generation. In: Applied Physics Letters, 91(2007), S. 081102.
- VDI Verlag (Hrsg.) (1993): VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf 1993.

- VDI Verlag (Hrsg.) (1996a): VDI-Richtlinie 2222: Blatt 1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Düsseldorf 1996.
- VDI Verlag (Hrsg.) (1996b): VDI-Richtlinie 3633: Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. Düsseldorf 1996.
- VDI Verlag (Hrsg.) (1998): VDI-Richtlinie 3978: Durchsatz und Spielzeiten in Stückgut-Fördersystemen. Düsseldorf 1998.
- VDI Verlag (Hrsg.) (2004): VDI-Richtlinie 4400: Blatt 2: Logistikkennzahlen für die Produktion. Düsseldorf 2004.
- VDI Verlag (Hrsg.) (2009): VDI-Richtlinie 5200: Fabrikplanung. Düsseldorf 2009.
- Verband für Arbeitsstudien (1974): Methodenlehre der Planung und Steuerung. Hanser Verlag, München 1974.
- Verworn, B./Herstatt, C. (2000): Modelle des Innovationsprozesses. Working Papers/Technologie-und Innovationsmanagement, Technische Universität Hamburg-Harburg 2000.
- Verworn, Birgit/Herstatt, Cornelius (2007a): Bedeutung und Charakteristika der frühen Phasen des Innovationsprozesses. In: Herstatt, Cornelius/Verworn, Birgit (Hrsg.): Management der frühen Innovationsphasen. Gabler, Wiesbaden 2007, S. 3–19.
- Verworn, Birgit/Herstatt, Cornelius (2007b): Strukturierung und Gestaltung der frühen Phasen des Innovationsprozesses. In: Herstatt, Cornelius/Verworn, Birgit (Hrsg.): Management der frühen Innovationsphasen. Gabler, Wiesbaden 2007, S. 111–134.
- Villforth (2010): Smart Labels - Recycling Strategy and a Recyclability Assessment. Presented at Presented at Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C). Frankfurt am Main 2010.
- Voigt, Monika M. u. a. (2011): Gravure printing for three subsequent solar cell layers of inverted structures on flexible substrates. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, 95(2011)2, S. 731–734.

- Völklein, Friedemann/Zetterer, Thomas (2006): Praxiswissen Mikrosystemtechnik: Grundlagen - Technologien - Anwendungen. Springer Wiesbaden 2006.
- Wang, Xiaodong u. a. (2012): An all-printed wireless humidity sensor label. In: Sensors and Actuators B: Chemical, 166–167(2012)0, S. 556–561.
- Wang, Zuoqian u. a. (2012): An Entirely Printed, Rechargeable Zinc-based Battery. In: Meeting Abstracts, MA2012-02(2012)2, S. 210–210.
- Warnecke, Hans J. (1996): Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. Hanser Verlag, München 1996.
- Weber, Jürgen (o. J.): Definition » Wirtschaftlichkeitsrechnung « Gabler Verlag (Hrsg.) Gabler Wirtschaftslexikon. (Verfügbar: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/15759/wirtschaftlichkeitsrechnung-v7.html>) (Zugriff am: 25.09.2012).
- Van de Weijer, P./van Mol, T. (2009): White paper on the characterisation of thin-film barrier layers for protection of organic Light-Emitting Diodes. In: ICT-216641 Fast2light, (2009), S. 1–17.
- Wengeler, L. u. a. (2011): Investigations on knife and slot die coating and processing of polymer nanoparticle films for hybrid polymer solar cells. In: Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 50(2011)5-6, S. 478–482.
- Wengeler, Lukas u. a. (2012): Comparison of large scale coating techniques for organic and hybrid films in polymer based solar cells. In: Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, (2012).
- Westkämper, E. (2006): Einführung in die Organisation der Produktion. Springer, Berlin Heidelberg New York 2006.
- Westkämper, E./Warnecke, H. J (2010): Einführung in die Fertigungstechnik. Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden 2010.
- Wikipedia (2012a): Substrat Wikipedia o. J. (Verfügbar: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Substrat&oldid=10737164>) (Zugriff am: 18.10.2012).

- Wikipedia (2012b): Substrate (electronics) Wikipedia o. J. (Verfügbar: [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Substrate_\(electronics\)&oldid=518524445](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Substrate_(electronics)&oldid=518524445)) (Zugriff am: 18.10.2012).
- Willmann, Jürgen u. a. (2012): Printed Electronics beyond Roll-to-roll – A Reflection of Alternative Substrate Transport Technologies. Presented at 2012 MRS - Fall Meeting, Boston 2012.
- Willmann, Jürgen/Stocker, Daniel/Dörsam, Edgar (2013): Is Roll-to-Roll the best Solution for Printed Electronics? - Characteristics and Evaluation Criteria of Substrate based Manufacturing. In: submitted at Organic Electronics, (2013).
- Wittmann, Robert G./Reuter, Matthias/Magerl, Renate (2007): Unternehmensstrategie und Businessplan: Eine Einführung. Redline Wirtschaft, München 2007.
- Wolfrum, B. (1994): Strategisches Technologiemanagement. Gabler, Wiesbaden 1994.
- Womack, James/Jones, Daniel/Roos, Daniel (1991): The machine that changed the world: the story of lean production. Harper Paperbacks, New York 1991.
- Wronski, C R M (1967): The size dependence of the melting point of small particles of tin. In: British Journal of Applied Physics, 18(1967)12, S. 1731–1737.
- Wu, I-Wen u. a. (2010): Correlation of energy band alignment and turn-on voltage in organic light emitting diodes. In: Applied Physics Letters, 96(2010)1, S. 013301.
- Wu, Yao-Shan u. a. (2005): Efficient white organic light emitting devices with dual emitting layers. In: Thin Solid Films, 488(2005)1–2, S. 265–269.
- Xiong, Zhaoting/Liu, Changqing (2012): Optimization of inkjet printed PEDOT:PSS thin films through annealing processes. In: Organic Electronics, 13(2012)9, S. 1532–1540.

- Xue, Jiangeng u. a. (2004): Asymmetric tandem organic photovoltaic cells with hybrid planar-mixed molecular heterojunctions. In: *Applied Physics Letters*, 85(2004)23, S. 5757–5759.
- Zhang, Bing/Chae, Heeyeop/Cho, Sung Min (2009): Screen-Printed Polymer: Fullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells. In: *Japanese Journal of Applied Physics*, 48(2009)2, S. 020208.
- Zheng, Lidong u. a. (2011): Morphology Evolution and Structural Transformation of Solution-Processed Methanofullerene Thin Film under Thermal Annealing. In: *The Journal of Physical Chemistry B*, 115(2011)25, S. 8071–8077.
- Zimmermann, B. u. a. (2011): ITO-free flexible inverted organic solar cell modules with high fill factor prepared by slot die coating. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2011)7, S. 1587–1589.
- Zürni, Susanne Ulbrich (2004): Möglichkeiten und Grenzen der Methode der Szenarioanalyse. Dissertation Technische Hochschule Zürich. Wiku-Verlag 2004.
- Zwicky, F. (1959): Morphologische Forschung. In: *Wesen und Wandel materieller und geistiger struktureller Zusammenhänge*. Winterthur, 2(1959).